This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

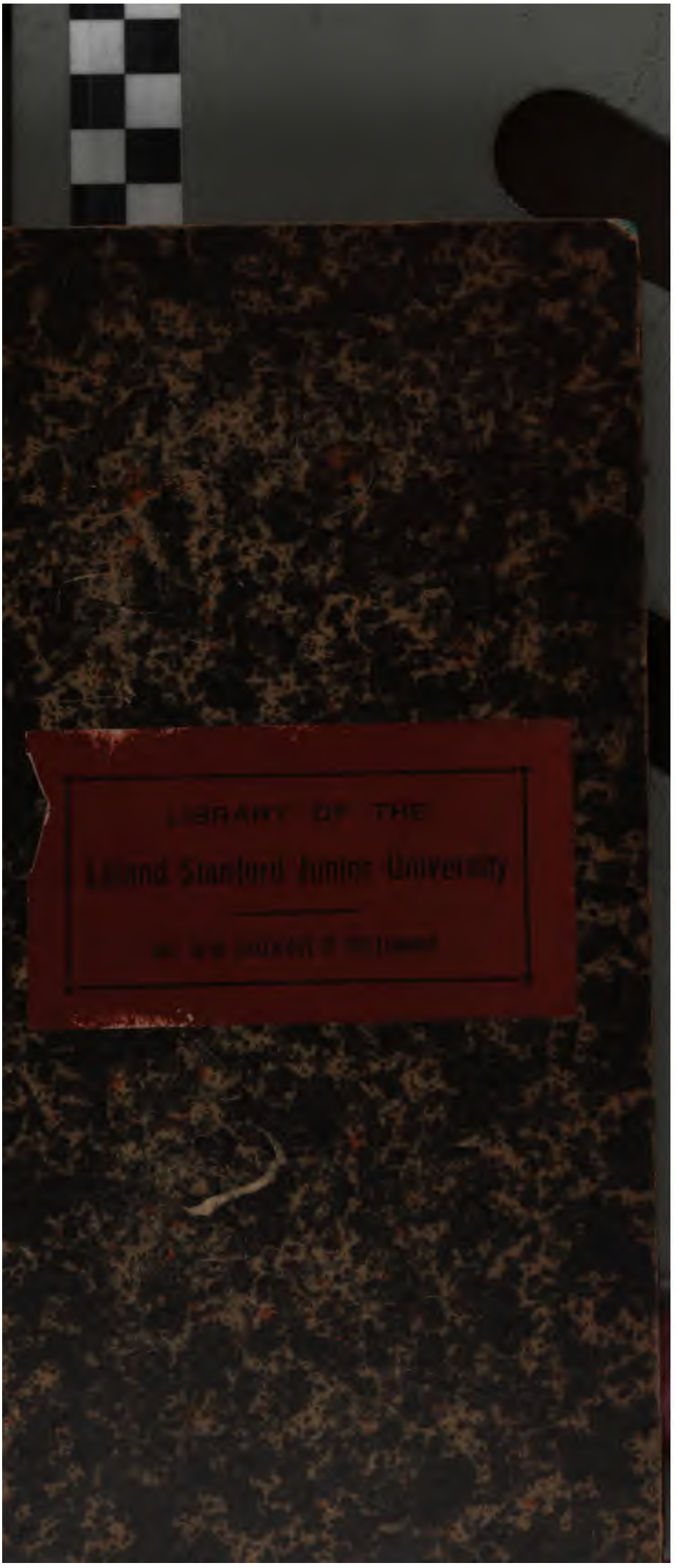
+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

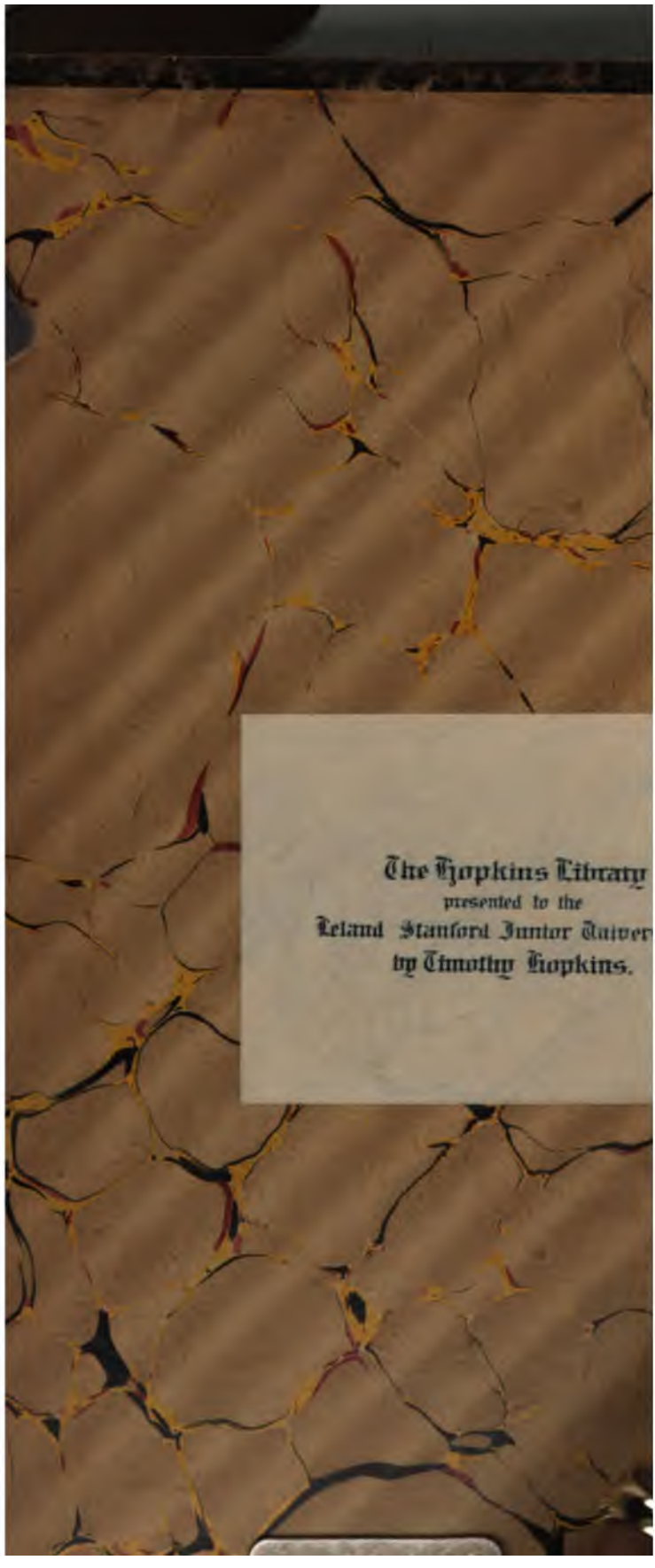
+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

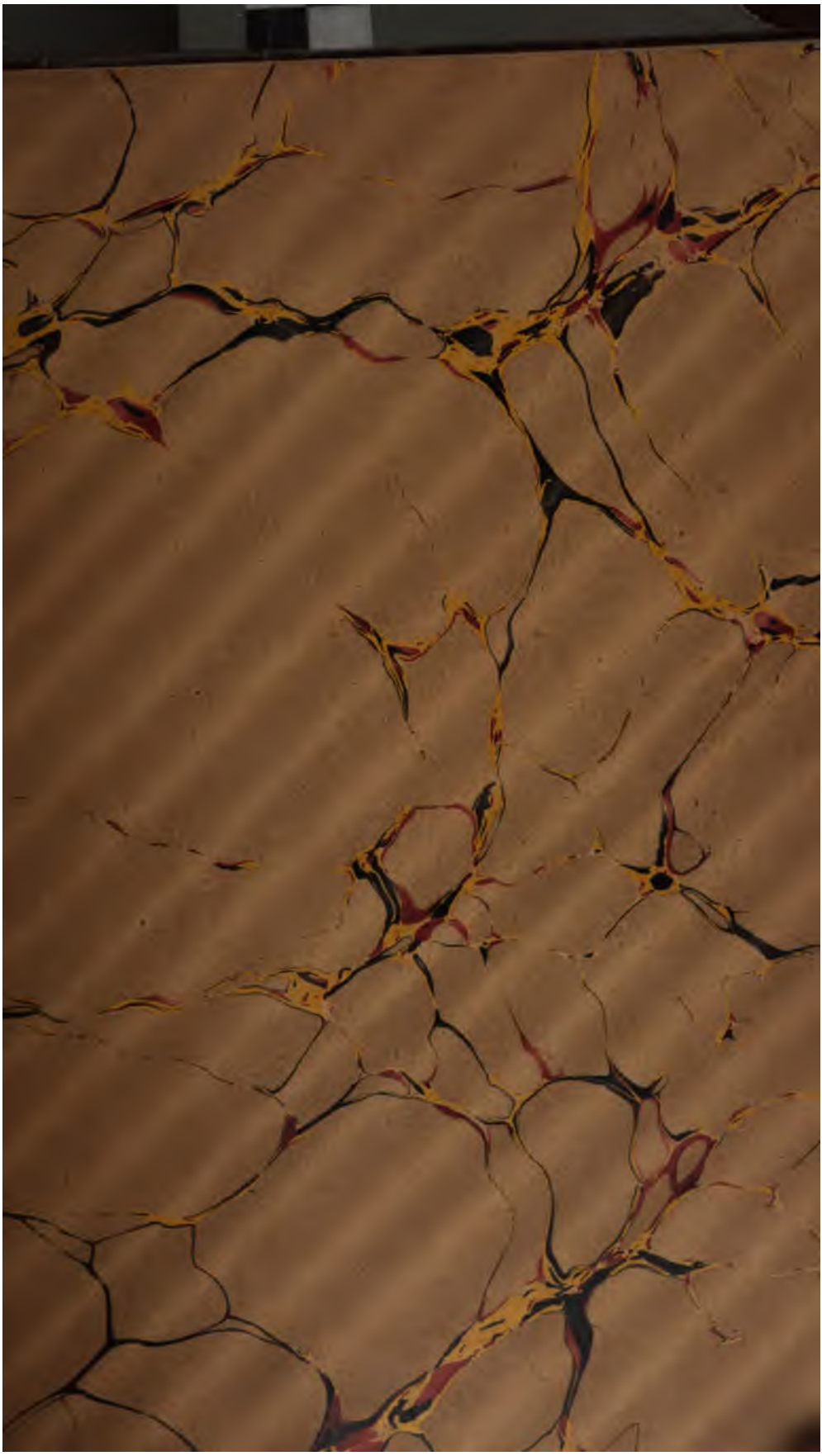
+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`


LIBRARY OF THE
Leland Stanford Junior University


The Hopkins Library
presented to the
Leland Stanford Junior Univer
by Timothy Hopkins.



YORK
BROADWAY

TF230
L15

CHEMIN DE FER

DE

CALAIS A MILAN

CHEMIN DE FER

DE

CALAIS A MILAN

LIGNE DIRECTE PAR BELFORT, BERNE
LA GEMMI ET LE SIMPLON

Réduction de 80 kilomètres sur le parcours actuel

LES GRANDS TUNNELS
DES ALPES ET DU JURA

PAR

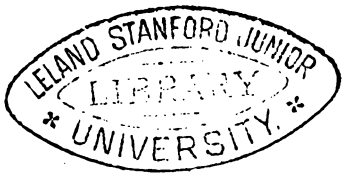
JAMES LADAME

ANCIEN ELÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE ET DE L'ÉCOLE DES MINES DE PARIS
EX-DIRECTEUR DE MINES ET USINES
ANCIEN INGÉNIEUR EN CHEF DES CHEMINS DE FER DU NORD DE L'ESPAGNE
DU PORTUGAL, DU CLERMONT-TULLE ET DU JURA INDUSTRIEL
ANCIEN CONSEILLER D'ÉTAT ET DIRECTEUR DES TRAVAUX PUBLICS DU CANTON
DE NEUCHATEL

EN VENTE

LIBRAIRIE H. LE SOUDIER
174, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 174

1889



H. 3926.

I

TRAVERSÉE DES ALPES BERNOISES

TUNNEL DE LA GEMMI

ORIGINE DU PROJET

Lorsque j'ai construit le chemin de fer de Neuchâtel à la Chaux-de-Fonds, il y a une trentaine d'années, j'étudiais déjà les divers projets mis en avant pour relier la Suisse avec l'Italie en traversant les Alpes. Parmi ces projets, le meilleur au point de vue technique comme au point de vue des intérêts nationaux, me semblait être celui du Simplon, mais à la condition de le compléter en perçant également la chaîne des Alpes Bernoises à Louèche, par un tunnel passant sous la Gemmi.

A l'époque dont je parle, soit vers 1858, je fis part de mes idées à M. Staempfli, alors conseiller fédéral et directeur du département des chemins de fer, ains qu'à M. Etzel, ingénieur en chef du Central Suisse, mais elles fixèrent peu leur attention : le moment

n'était pas encore venu d'étudier la traversée des Alpes et le trafic international ; on était trop occupé de satisfaire avant tout les intérêts locaux.

Le Simplon, il faut le reconnaître, se trouve dans un cul-de-sac et complètement séparé de la plus grande partie de la Suisse, pour laquelle il ne présente ainsi aucun intérêt. En perçant la Gemmi, au contraire, Berne, ville fédérale, centre naturel de la Suisse, est mis en communication directe et facile avec Milan et toute l'Italie. Placée sur la principale artère des relations entre le nord et le midi de l'Europe, cette ville prend immédiatement une grande importance au point de vue commercial, politique et militaire. Le canton de Berne et surtout l'Oberland, qui sont acculés au massif infranchissable des Alpes Bernoises, trouvent tout à coup une magnifique porte de sortie vers l'Italie.

La longue vallée du Valais n'a d'autre issue vers la Suisse que la gorge de Saint-Maurice et étouffe entre les montagnes qui l'emprisonnent de toute part. Lorsque ce canton aura une communication facile avec Berne, ce sera pour lui une transformation complète et une source considérable de richesse, d'autant plus que la trouée de la Gemmi se trouvera, par un heureux hasard, placée, comme celle du Simplon, au milieu même de la vallée. Les produits agricoles de ce riche pays doubleront de valeur. Les touristes, dont le plus grand nombre reculent aujourd'hui devant le long voyage qu'il faut faire pour y pénétrer, viendront en foule admirer les beautés que la nature a réunies dans cette contrée sans pareille ou jouir de son climat privilégié.

La ville de Berne ne sera plus qu'à 84 kilomètres de Louèche et des bords du Rhône, tandis qu'elle est à 98 kilomètres de Lausanne. On ira donc en moins de temps de Berne à Louèche que de Berne à Lausanne, ou que de Berne à Lucerne (distance 95 kilomètres). — De Berne à Milan la distance sera de 251 kilomètres, soit celle de Lausanne à Winterthur ou celle de Bâle à Genève (244 kilomètres).

De Calais à Milan, la distance pourra être réduite d'environ 80 kilomètres sur le parcours actuel par le Saint-Gothard, ainsi qu'on l'expliquera plus loin (page 21). Il y aura donc une amélioration énorme réalisée dans le trafic international.

Il convient de remarquer à ce sujet que si l'on trace sur une carte une ligne droite de Calais à Milan, elle passe exactement par Berne, Bienne, Montbéliard et Lure ; elle passe à 24 kilom. de Delémont, à 18 kilom. au sud de Belfort, à 18 kilom. au nord de Reims, à 60 kilom. d'Amiens et à 6 kilom. d'Arras.

La ligne suivie par un chemin de fer diffère toujours en général de la ligne droite mathématique. La différence entre ces deux lignes est beaucoup plus grande qu'on ne le croit généralement ; ainsi elle est de 35 % sur le trajet actuel de Calais à Belfort, de 28 % entre Paris et Belfort, de 55 % entre Belfort et Thoune ; elle sera encore de 30 % entre Belfort et Milan après l'exécution des lignes que nous proposons.

Les sinuosités que font les chemins de fer sur une carte ne sont pas les seules qui allongent la durée des

voyages, il y a encore les sinuosités en profil, rampes et pentes qui ont souvent une grande influence sur la vitesse des trains ; ainsi pour le trajet de Paris à Milan on trouve par le calcul que les rampes à gravir équivalent à une augmentation de parcours de 12 % en passant par le Mont-Cenis, de 17 % en passant par Pontarlier et le Simplon, et de 17 % également en passant par Belfort et le Saint-Gothard. Entre Auxonne et Lausanne, l'augmentation est de 46 % ; elle est de 50 % entre Bâle et Olten. Ces chiffres sont extraits du mémoire technique publié par le Comité du Simplon en 1882.

La traversée des Alpes, de Berne à Milan, par la Gemmi et le Simplon, sera beaucoup moins coûteuse que celle du Saint-Gothard, car la Compagnie du Saint-Gothard a dépensé environ 250 millions de francs pour franchir les Alpes à la cote 1.145 mètres, tandis que par la Gemmi, le point le plus élevé ne sera qu'à 950 mètres, soit 200 mètres plus bas environ *(voir le profil en long)* (1), et la dépense à faire pour relier Thoune à Domo-d'Ossola, ne sera que de 150 millions environ au lieu de 250. Il semble donc évident que si la question de la traversée des Alpes

(1) La cote de 950 mètres est celle du sommet de la voie dans le tunnel de la Gemmi.

Au Simplon, la cote maximum dans le tunnel est 708 mètres avec le projet Meyer, de 1882 ; les têtes sont aux cotes 689 mètres et 627m 50 ; le tunnel a 19,795 mètres de long. Avec le projet de 1886, du même ingénieur, la cote maximum dans le tunnel est 845m28, les têtes sont aux cotes 820 mètres et 830 mètres et le tunnel a 16.070 mètres de long. Comme on le voit, ce second projet est bien inférieur au premier, puisqu'il imposerait indéfiniment à tous les trains de l'exploitation une ascension inutile de 140 mètres, représentant une résistance à vaincre équivalente à celle d'un

avait été étudiée au début dans son ensemble, la ligne de Berne-Simplon-Milan aurait été préférée à celle du Saint-Gothard. On sait d'ailleurs que c'est l'Allemagne surtout qui, par son intervention en 1871, a fait triompher définitivement l'entreprise du Saint-Gothard, en accordant une subvention de 20 millions de francs (28 octobre 1871). Mais la ligne du Simplon complétée par la traversée de la Gemmi présente encore de tels avantages et satisfait de si nombreux intérêts, qu'elle ne peut pas manquer de réussir dans un bref délai, car, indépendamment de la grande utilité qu'elle présentera comme ligne locale en Suisse, ainsi qu'on vient de l'expliquer sommairement, elle est destinée, comme ligne directe de Calais-Belfort-Berne-Milan, à satisfaire des courants commerciaux d'une importance supérieure (1).

Ayant quitté la Suisse en 1860, j'avais complètement perdu de vue le Simplon et la Gemmi, et c'est

parcours en plaine de 28 kilomètres. Ce défaut sera mal vu du public dont on a cherché à gagner la sympathie, depuis trente ans, en lui répétant sans cesse que la traversée du Simplon était la plus parfaite de toutes, attendu qu'elle était la seule qui n'exigeât pas des rampes d'accès onéreuses et une ascension dans les régions élevées où le climat est des plus rigoureux.

Depuis 1857 jusqu'à aujourd'hui, on a présenté au public près de trente projets principaux pour le Simplon, soit environ un par année. Le journal le *Génie civil*, du 25 mai 1887, en donne une énumération incomplète, où l'on voit indiqués douze projets parus de 1857 à 1864, et douze autres de 1864 à 1886 ! !

(1) Au mois de mars 1869, le gouvernement italien avisa le conseil fédéral qu'il préférait le Saint-Gothard aux autres lignes projetées pour traverser les Alpes. Une convention conclue à Berne, le 15 octobre 1869, entre la Suisse et l'Italie, portait, article 5 :

« La subvention nécessaire pour rendre possible l'exécution de » cette ligne est fixée à 85 millions; la Suisse y participera pour » 20 millions et l'Italie pour 45. »

En réalité, par suite de l'insuffisance des premiers devis, les

en quelque sorte par le fait du hasard que je m'en occupe aujourd'hui pour attirer l'attention du public sur cette intéressante question.

Il y a trente ans la carte d'état-major fédéral n'était pas faite, il était par conséquent difficile, sans aller sur le terrain et sans exécuter des opérations coûteuses, de se faire une opinion même approximative sur la possibilité de traverser les Alpes Bernoises dans des conditions raisonnables. Aujourd'hui cette lacune est remplie, car la carte de la Gemmi a été faite en 1884, et celle de Sierre, qui lui fait suite, date de 1886. Ces cartes sont donc toutes récentes et c'est en les apercevant à la vitrine d'un libraire de Genève, au mois d'août dernier, que j'ai eu la curiosité de rechercher si, comme je l'avais pensé autrefois, la traversée de la Gemmi était réalisable. J'ai été très satisfait de constater, par l'étude approfondie de ces cartes, que cette traversée ne présentait en effet aucune difficulté exceptionnelle. Cette question a d'ailleurs en ce moment un certain regain d'actualité pour deux raisons; en premier lieu, ce sont les efforts que la Compagnie de la Suisse Occidentale fait pour trouver les capitaux nécessaires à l'exécution du Simplon; en second lieu, c'est que les difficultés soulevées

subventions ont dû, en 1877, être portées à 28 millions pour la Suisse, 55 pour l'Italie et 30 pour l'Allemagne; total 113 millions. Les 28 millions fournis par la Suisse ont été répartis comme suit :

La Confédération a fourni 4,500,000 fr., le Central Suisse et le Nord-Est chacun 4,260,000 fr., le Tessin 3,000,000 fr., Lucerne 2,200,000 fr., Zurich 2,002,000 fr., Bâle-Ville 1,602,000 fr., Berne 1,502,000 fr., Argovie 1,422,000 fr., Schwitz 1,030,000 fr., Uri 1,000,000 fr. Soleure 350,000 fr., Zug 250,000 fr., Bâle-Campagne 211,500 fr., Schaffhouse 200,000 fr., Thurgovie 140,000 fr., Obwald 45,000 fr., Nidwald 25,000 fr.

récemment par l'Allemagne dans ses rapports commerciaux avec la France, font désirer que les relations de l'Angleterre, de la Belgique et du nord de la France avec l'Italie puissent se faire rapidement sans passer par les chemins de fer allemands et le Saint-Gothard.— Il y a donc là une question importante que la traversée de la Gemmi semble résoudre d'une manière satisfaisante.

DESCRIPTION DU TRACÉ ENTRE THOUNE ET LOUÈCHE

De Thoune à Louèche la distance en ligne directe est de 52 kilomètres. La chaîne des Alpes Bernoises offre dans cette direction une grande dépression presque rectiligne correspondant sans doute à une faille du terrain jurassique qui paraît très puissant dans cette région.

Le trajet de Thoune à Louèche se divise naturellement en deux sections principales :

La **première section**, de Thoune au Blauseeli ou à Mitthoz, comprend la partie inférieure de la vallée de la Kander sur 28 kilomètres de long. Cette vallée, qui, à Thoune, est à la cote 562 mètres, s'élève peu à peu jusqu'à Mitthoz (cote 930 mètres) avec des pentes ne dépassant pas 25 ‰ et dont la moyenne est d'environ 13 ‰. Dans toute cette région la construction d'un chemin de fer ne présente aucune difficulté et la dépense à faire ne dépasserait probablement pas 200,000 francs par kilomètre.

[illegible] section commence à Mitthoz où la [illegible]nt beaucoup plus forte et [illegible]mètres de long, un ressaut [illegible] haut pour atteindre la cote [illegible]e ensuite peu à peu sur [illegible] atteint près des hôtels de [illegible]0 mètres. C'est près de ces [illegible]emmi s'élève brusquement [illegible]escarpée avec des sommets [illegible]s dans le **Passage** même [illegible]viron 7 kilomètres la cote [illegible]ère que de 1,900 mètres à [illegible]mmet du col est à 2,329 mètres. [illegible] montagne est encore plus [illegible]rd et s'arrête grosso-modo à [illegible]s des bains de Loèche, point [illegible]weg du ravin où coule la Dala [illegible]environ 10 % à 12 % jusqu'au [illegible]ne étendue de 8 1/2 kilomètres. [illegible]assif de la Gemmi entre les hôtels [illegible]re 1,500 mètres, près des bains [illegible] kilomètres.

[illegible] seconde section de 24 kilomètres [illegible]es difficultés sont concentrées et [illegible] un tunnel.

[illegible]joint donne une image assez [illegible]sol sur ces 24 kilomètres. Il a été [illegible]e la carte de l'état-major et corres- [illegible]brisée composée de trois éléments [illegible] de *Blauseeli* et suit la direction [illegible]e la vallée jusqu'au Bädli, soit sur

3 kilomètres de long. Le second élément, de 18 kilomètres de long, part de ce point et se dirige sur le petit pont qui est figuré sur la carte à 2 kilomètres environ en amont de Inden; ce second élément s'arrête à 1,400 mètres plus bas que ce pont au milieu de la rivière. Enfin le troisième élément, de 4 kilomètres de long, part de ce dernier point et s'arrête au chemin de fer du Valais à un kilomètre à l'aval de la gare de Louèche. Cette ligne brisée a eu pour but de suivre autant que possible le thalweg des vallées de la Kander et de la Dala, sauf dans la partie montagneuse où elle coupe au droit en passant par le sommet du *petit Rinderhorn* qui est à la cote 3,007 mètres (1). Ce tracé serait évidemment très défectueux comme direction à donner aux tunnels, car on y rencontrerait des températures souterraines excessives qu'il est nécessaire d'éviter, aussi conviendra-t-il de faire passer le tunnel sous le col même de la Gemmi et de remplacer dans ce but l'alignement droit de Bädli à Inden par deux autres alignements se rencontrant sur la rive Est du *Daubensee*. En opérant ainsi, la cote du terrain au-dessus du tunnel ne dépassera pas 2,500 mètres.

TUNNEL DE LA GEMMI. — TROIS SOLUTIONS

Le tracé du tunnel *en plan* est, comme on vient de le dire, très facile et tout indiqué, mais il n'en est plus de même pour la *coupe verticale* ou *profil en long* qui peut varier de bien des manières, suivant les

(1) Le grand Rinderhorn, qui est à 1 kilomètre plus à l'Est, a une hauteur de 3,457 mètres.

divers points de vue où l'on se placera, et suivant les éléments d'appréciation dont on pourra disposer. J'ai cependant indiqué sur le profil en long ci-joint trois solutions, dont deux extrêmes et une intermédiaire. Je vais les analyser en quelques mots, pour en signaler les avantages et les inconvénients, et préluder ainsi à la discussion générale de cet avant-projet.

La **première solution** aurait pour but de réduire le tunnel à la longueur la plus faible possible et de donner ainsi satisfaction aux personnes qui redoutent les grands tunnels. Le tunnel le plus court qu'on puisse tracer aurait une longueur de 17 kilomètres et une rampe de 23 ‰. Il partirait de Mitthoz à la cote 920 mètres et déboucherait un peu au-dessous des bains de Louèche à la cote 1,320 mètres. Ce tracé serait le plus économique au point de vue des frais d'établissement de la ligne entière si on trouvait en sortant du tunnel un coteau à ondulations douces et régulières qui permit de descendre jusqu'à Viège sans dépenser plus de 150,000 francs par exemple par kilomètre. Or, en partant des bains de Louèche à la cote 1,320 mètres, il faudrait pour rejoindre à Viège la ligne du Valais à la cote 650 mètres, un développement de 27 kilomètres avec une pente continue de 25 ‰. Malheureusement le terrain, loin d'être facile dans cette région, est des plus accidentés et un chemin de fer en flanc de coteau coûterait des sommes considérables, et bien supérieures, à mon avis, à celles qu'exigerait l'allongement du tunnel. On voit donc de suite que le tunnel le plus court ne donnerait

pas, comme on pourrait le croire, la solution la plus économique. Cette solution aurait d'ailleurs un très grave inconvénient, c'est d'imposer à l'exploitation une ascension inutile de 400 mètres et ce fait seul suffit pour la faire exclure complètement. Elle ne pourrait s'imposer aux ingénieurs que s'il était démontré par des sondages et des études géologiques, qu'en plaçant le tunnel plus bas on trouverait dans l'intérieur de la montagne des difficultés insurmontables, tels que des terrains de mauvaise qualité, des quantités d'eau considérables et très chaude, des températures excessives, etc., etc.

La **seconde solution** consisterait à percer un tunnel de 24 kilomètres de long, rejoignant directement Mitthoz avec la ligne ferrée du Valais près de la gare de **Louèche**. Ce tunnel aurait 7 kilomètres de plus que le précédent, mais il permettrait, en échange, de supprimer complètement les 27 kilomètres de chemin de fer à flanc de coteau qu'exige la première solution.

Sur les 24 kilomètres à percer, il y en aurait environ 10, soit 5 en amont et 5 à l'aval, qui pourraient facilement être exécutés au moyen de puits, suivant les méthodes courantes, ce qui aurait pour effet d'accélérer les travaux et de faciliter l'aérage des chantiers. Un des grands avantages que présenterait également ce tunnel, serait d'avoir une pente modérée de 12 1/2 ‰ seulement et précisément égale à celle qui avait été adoptée à l'aval du tunnel du Simplon dans les études faites par M. l'ingénieur Meyer en 1882. Si ce dernier projet avait été maintenu, il y

aurait évidemment un grand intérêt à conserver une pente de 12 1/2 ‰ dans la traversée de la Gemmi, mais ce projet ayant été abandonné et remplacé par un autre avec pente de 25 ‰, il n'y a aucune raison pour traverser la Gemmi avec des pentes plus faibles que celles adoptées pour la traversée du Simplon.

Le plus grand inconvénient que présente la seconde solution, c'est que le tunnel se trouve placé à une assez grande profondeur où il peut rencontrer des terrains difficiles et des températures trop élevées. Ce n'est d'ailleurs que par une étude géologique approfondie, aidée et appuyée, si c'est nécessaire, par des sondages convenables, qu'on pourra décider si cette solution doit être absolument rejetée et s'il convient de la remplacer par une *solution intermédiaire* analogue à celle que je vais indiquer, sous le titre de troisième solution.

Troisième solution.— Le ravin suivi par la Dala, entre les bains de Louèche et le Rhône, ayant une pente de 10 à 12 ‰, il en résulte que si l'on allonge le tunnel de 1 kilomètre par exemple, le niveau de sa tête sud s'abaissera de 100 mètres, ce qui aura pour effet de réduire de 4 kilomètres la longueur du raccordement sur Viège.

On peut donc concevoir plusieurs projets intermédiaires aux deux précédents et dans lesquels, au lieu d'avoir un tunnel de 17 ou de 24 kilomètres, on aurait un tunnel de 20, 21 ou 22 kilomètres, raccordé avec la vallée du Rhône par une ligne à flanc de coteau, ayant une longueur correspondant à l'abaissement de

la tête du tunnel. En étudiant le terrain, on pourra trouver la solution la plus économique et la plus avantageuse, c'est-à-dire la longueur de tunnel qui donnera le minimum de dépense totale.

J'ai indiqué une de ces solutions intermédiaires sur le profil en long, afin d'en mieux préciser les termes, et voici en quelques mots les avantages qu'elle présente :

1° Le tunnel étant en pente vers chacune de ses deux têtes, au lieu d'avoir un seule pente, l'écoulement des eaux, si l'on en rencontre, se fera facilement depuis les chantiers d'attaque et on évitera non seulement des épuisements coûteux, mais encore des retards et des difficultés de diverses natures ;

2° La pente du côté de Thoune étant de 2 $^0/_{00}$, relèvera de 30 mètres le niveau de la voie au sommet du tunnel, qui sera ainsi à la cote 950 mètres. Ce relèvement est sans doute nuisible au point de vue de l'exploitation, mais il est trop peu important pour ne pas être adopté, eu égard aux avantages qu'il procurera pour la construction de l'ouvrage ;

3° La tête sud du tunnel étant à la cote 820 mètres, serait raccordée au chemin de fer du Valais par une ligne à flanc de coteau de 7 1/2 kilomètres de long avec pente de 25 $^0/_{00}$. — La rencontre des deux lignes aurait lieu près de la gare de Turtmann qui est à 4580 mètres à l'est de celle de Louèche, et à la cote 628^{m}81.

4° Le tunnel aurait dans sa partie sud une pente de 20 $^0/_{00}$ sur 6,500 mètres de long. Cette pente n'a rien d'absolu et peut, ainsi que son point de départ au centre du tunnel, être modifiée de diverses manières

suivant les circonstances. La longueur totale du tunnel serait dans ces conditions de 21 1/2 kilomètres.

5° La profondeur du tunnel au-dessous du *Passage de la Gemmi* ne dépasserait guère 1,400 mètres et serait par conséquent favorable au point de vue des températures souterraines ; car elle est inférieure à celle des autres tunnels des Alpes qui est de 1,717 mètres au Saint-Gothard, de 2,080 mètres au Simplon (projet 1886) et de 1,609 mètres au Mont-Cenis.

6° La troisième solution permettra peut-être d'éviter en tout ou en partie les difficultés qu'une étude géologique de la Gemmi pourra faire prévoir soit au point de vue de l'abondance des eaux, soit au point de vue de la nature des terrains.

ABRÉVIATIONS DES DISTANCES RÉSULTANT DU PERCEMENT DE LA GEMMI

On a déjà indiqué sommairement quelques-unes des améliorations qui résulteraient du percement de la Gemmi, soit pour les relations de la Suisse avec le Valais, soit pour celles de la Suisse et de l'Europe Occidentale avec l'Italie. Nous allons entrer dans quelques détails au sujet de cette question importante.

Les calculs qui vont suivre supposent l'exécution de diverses variantes qui auront pour effet de raccourcir notablement les distances entre Berne, nouvelle porte de l'Italie, et les points de la frontière suisse par les-

quels passe le trafic international, savoir : Bâle, Belfort et Pontarlier.

Variantes. — Voici les variantes dont il s'agit :

1° *De Pontarlier à Berne* le chemin de fer passe par Bienne, ce qui allonge notablement la distance entre ces deux villes. Dans le but d'améliorer cette situation un comité s'est formé à Neuchâtel, il y a quelques années, pour étudier une ligne directe entre cette dernière ville et Berne. Ce comité a publié en 1881 un rapport d'après lequel la ligne à construire aurait 38 kil. de long, coûterait 8 1/2 millions et procurerait un raccourci de 19 kilomètres.

2° *De Belfort à Berne* le chemin de fer fait un grand détour en passant par Delémont, mais il serait facile de le réduire de 26 kilomètres en construisant une ligne de 12 kilomètres qui relierait directement les gares de Glovelier et Reconvilier en passant par Undervilier. Cette nouvelle ligne aurait une pente de 25 ‰ ; elle exigerait la construction d'un tunnel de 5 kilomètres et coûterait environ 6 millions. Cette dépense se justifierait par deux raisons, la première c'est qu'un raccourci de 26 kilomètres amènera nécessairement sur le réseau du Jura-Berne-Lucerne, un trafic international important qui lui échappe actuellement ; la seconde, c'est qu'en supposant une recette de 25,000 fr. par kilomètre pour les lignes de cette région, le raccourci de 26 kilomètres procurera annuellement au commerce et au public en général une économie de 650,000 fr.

3° *Entre Bâle et Berne* on peut réduire de 16 kilomètres le parcours actuel en construisant une ligne

directe de Liestal à Herzogenbuchsee en passant par Balsthal.

4° Pour éviter aux trains internationaux le rebroussement qui a lieu dans la ville de Berne, il conviendra de raccorder directement la ligne de Bienne avec celle de Thoune. Ce raccordement se fera facilement au dessous de la Waldau et aura 2 1/2 hilomètres de long; il réduira de 6 kilomètres le parcours des trains allant de Belfort ou de Bâle en Italie. La station d'Ostermundigen deviendra la gare internationale de Berne et le centre d'un réseau de *voies de triage*.

5° Enfin dans un chapitre spécial consacré au Simplon, j'indique un nouveau tracé qui raccourcira de 5 kilomètres le dernier projet fait en 1886 et proposé actuellement par la Compagnie de la Suisse occidentale.

En tenant compte de ces variantes, voici les longueurs des diverses lignes internationales intéressées au percement des Alpes Bernoises.

A. — Berne-Milan

1° Par la Gemmi et le Simplon..... 269 kil. 30

DÉTAILS	
Berne-Thoune (Scherzligen)...	31k 370
Scherzligen à Tunnel-Gemmi..	28k 000
Tunnel-Gemmi	21k 500
Du tunnel à Brigue.....	30k 000
De Brigue au tunnel Simplon .	1k 200
Tunnel du Simplon.....	21k 500
Tu tunnel à Domo-d'Ossola....	13k 130
Domo-d'Ossola-Milan	122k 600
Total.....	269k 300

2° Par Lucerne et le Saint-Gothard. 379 kil.

B. — Bâle-Milan

1° Par Olten-Saint-Gothard ..... 366 kil.
2° Par Olten-Berne-Simplon ..... 370 kil.

DÉTAILS

Bâle-Olten-Berne.....	107ᵏ
Berne-Milan.....	269ᵏ 32
Total.....	376ᵏ 32

6 kil. à déduire pour raccourci à Berne par l'exécution d'une voie directe.

3° Par Balsthal-Berne-Simplon .. .. 354 kil.

Raccourci de 16 kil. obtenu en construisant une voie plus directe de Liestal à Herzogenbuchsee, par Balsthal.

C. — Bâle-Gênes

1° Par le Mont-Cenis..... 720 kil.
2° Par le Saint-Gothard..... 508 kil.
3° Par Balsthal-Berne-Simplon..... 462 kil.

DÉTAILS

Bâle-Balsthal-Thoune	116ᵏ
Thoune-Domo-d'Ossola.....	115ᵏ
Domo-d'Ossola-Gênes.....	231ᵏ
Total.....	462ᵏ

D. — Belfort-Milan

1° Par Mulhouse-~~Berne~~-St-Gothard . 453 kil.
2° Delémont-Bâle-Saint-Gothard.... 467 kil.

DÉTAILS

Belfort-Mulhouse-Bâle.....	87ᵏ

Belfort-Delémont-Bâle..... 101k
Bâle-Saint-Gothard-Milan..... 366k

3°. Par Berne et le Simplon ..... 384 kil.

DÉTAILS

Belfort-Berne, distance actuelle 147k
Berne-Milan..... 269k 32

Total..... 416k 32

A déduire 26 kil., raccourci obtenu en construisant une voie nouvelle de Glovelier à Reconvilier en passant par Undervilier. Un second raccourci de 6 kil. a lieu à Berne. Raccourci total 32 kil.

E. — Paris-Berne

1° Par Belfort ..... 564 kil.

DÉTAILS

Paris-Belfort..... 443k
Belfort-Berne, distance actuelle 147 kil. réduite par le raccourci près de Delémont à. 121k

Total..... 564k

2° Par Pontarlier-Neuchâtel..... 556 kil.

Distance actuelle 575 kil., réduite par un raccourci de 19 kil. projeté entre Neuchâtel et Berne à 556 kil. — Distance actuelle Neuchâtel-Berne par Bienne, 63 kil., réduite à 44 kil.

F. — Paris-Milan

1° Par le Mont-Cenis ..... 946 kil.
2° Par Pontarlier-Lausanne-Simplon (projet 1888)..... 829 kil.

3° Par Neuchâtel-Berne-Simplon ... 825 kil.

Paris-Berne, 556 kil. — Berne-Milan, 269 kil.

4° Par Belfort-Berne ..... 827 kil.

Paris-Belfort, 443 kil. — Belfort-Milan, 384 kil.

5° Par le Saint-Gothard ..... 910 kil.

G. — Paris-Gênes

1° Par Marseille ..... 1274 kil.
2° Par le Mont-Cenis ..... 953 kil.
3° Par Belfort-Berne-Simplon ..... 935 kil.

Paris-Belfort, 443 kil. — Belfort-Thoune, 146 kil. — Thoune-Domo-d'Ossola, 115 kil. — Domo-d'Ossola-Gênes; 231 kil.

H. — Paris-Rome

1° Par le Mont-Cenis..... 1452 kil.
2° Par Belfort-Berne-Simplon-Gênes. 1434 kil.

Paris-Belfort-Gênes, 935 kil. — Gênes-Rome, 499 kil.

I. — Calais-Milan

1° Par Reims-Delémont-Bâle et Saint-Gothard ..... 1164 kil.

DÉTAILS

Calais-Reims-Belfort.....	697k
Belfort-Delémont-Bâle-Saint-Gothard.....	467k
Total.....	1164k

2° Par Reims-Belfort-Berne..... 1081 kil.

3° Par Paris-Berne ..... 1121 kil.

Calais-Paris, 296 kil. — Paris-Berne-Simplon, 825 kil.

RÉSUMÉ

Les abréviations de distances qui résulteront du percement de la Gemmi et que nous venons d'indiquer sont résumées dans le tableau suivant.

LIEUX DE DÉPART	LIEUX D'ARRIVÉE	
	MILAN	GÊNES
	kilom.	kilom.
Berne.....	110	142
Bâle.....	12	46
Belfort.....	83	117
Paris.....	83	117
Calais.....	83	117

Je viens d'exposer les nombreux avantages que présentera la percée des Alpes Bernoises. J'avais d'abord pensé ne publier que les pages qui précèdent pour attirer l'attention du public et des gouvernements sur cette importante affaire; mais il m'a paru nécessaire de compléter ce travail par une étude des grands tunnels déjà exécutés en Suisse et même à l'étranger, afin de pouvoir établir sur des bases rationnelles l'évaluation des dépenses à faire pour réaliser la nouvelle voie ferrée qu'il s'agit d'ouvrir à travers les Alpes.

Ces études feront l'objet des chapitres suivants et nous commencerons par la description des trois grands tunnels exécutés dans le Jura, savoir: le Crédo, les Loges et le Hauenstein.

II

DESCRIPTION DES GRANDS TUNNELS DU JURA

1° TUNNEL DU CREDO

(PRÈS DE BELLEGARDE)

Ce tunnel a 3,949 mètres de long, il est à deux voies et a été construit de 1854 à 1858. Il n'a présenté aucune difficulté d'exécution. Il traverse 401 mètres de sable et gravier, 3,189 mètres de molasse, 250 mètres de grès bigarré, 109 mètres de calcaire jurassique.

On a rencontré peu d'eau.

On a ouvert six puits ayant ensemble une profondeur de 893 mètres. Le plus profond avait 216 mètres.

Ce tunnel n'est revêtu que sur les deux tiers de sa surface intérieure. Les revêtements ont 0^m65 d'épaisseur dans les graviers et les marnes, et 0^m50 dans les calcaires et la molasse.

Il a coûté 1,640 fr. le mètre courant.

2° TUNNEL DES LOGES

(JURA NEUCHATELOIS) (1)

Terrains. — Le tunnel des Loges a 3,259 mètres de long; il est tout entier dans le *terrain jurassi-*

(1) Le chemin de fer du Jura-Neuchâtelois s'appelait à l'origine *Jura Industriel.*

que dont il traverse les divers étages sur les longueurs suivantes, savoir : le Virgulien 230 mètres, le Ptérocérien 160 mètres, l'Astartien 1,915 mètres, l'Oxfordien 328 mètres, le Jura inférieur (Jura brun), 390 mètres, le Lias (Jura noir) 236 mètres.

Dès le début de l'entreprise du Jura Neuchâtelois, j'ai fait faire une étude approfondie des terrains que devaient traverser les deux grands tunnels des Loges et du mont Sagne. Ces études ont été faites avec beaucoup de talent et de dévouement par M. Gressly avec le concours de M. Desor.

Ces études ont été consignées dans un ouvrage spécial publié à Neuchâtel le 15 mars 1859, par MM. Desor et Gressly. Voici ce que disent ces géologues dans leur préface au sujet de ces études :

« Ce n'est pas une monographie du pays de » Neuchâtel que nous avons voulu faire. Une » occasion se présentait de vérifier la justesse de » nos théories, en les appliquant à une grande entre- » prise. Invités à faire connaître, à ceux que cela » intéressait, la composition de l'intérieur de nos » montagnes, nous avons accepté le défi honorable » qui nous était adressé. Nous avons essayé d'es- » quisser la structure de l'intérieur de ces monta- » gnes, qu'aucune main n'avait encore entamées, » mais que nous espérons voir bientôt traversées par » une voie ferrée. Nous avons indiqué la nature des » roches, les difficultés qu'elles présenteront au point » de vue technique, ainsi que les avantages qu'on » pourra en retirer.

» Si, dans le cas particulier, nous avons été plus » hardis que d'autres, c'est grâce à la munificence » des Conseils de la République, qui, après avoir » fourni à l'un de nous les moyens de donner à ses » études toute l'étendue qu'elles réclament, nous met » aujourd'hui en mesure de les livrer au public. Il » ne nous reste plus, en terminant, qu'à réclamer, » pour cet essai, le premier de son genre, toute l'in- » dulgence des hommes de science, et à faire des » vœux pour que l'expérience veuille bien confirmer » nos prévisions, afin que cette voie souterraine que » nous décrivons par anticipation réalise toutes les » espérances qu'y rattachent les amis du progrès. »

Avancement des Travaux. — Le tableau suivant fait connaître les avancements mensuels qui ont eu lieu dans les diverses natures de terrains :

NATURE DU TERRAIN	AVANCEMENTS MENSUELS			
	PETITE GALERIE		PUITS	
	MAXIMUM	MOYENNE	MAXIMUM	MOYENNE
	Mètres	Mètres	Mètres	Mètres
Virgulien.....	25	15	12	12
Ptérocérien.....	30	20	14	11
Astartien.....	30	20	16	11
Marnes oxfordiennes.	38	27	15	8
Oolithe inférieure....	25	19	—	—
Marnes du Lias.....	35	25	18	12

Maçonnerie. — D'après les prévisions des géolo

gues, le calcaire de l'étage Astartien ne devait pas exiger de revêtement en maçonnerie, mais en exécution, il a fallu le voûter sur plus de la moitié de sa longueur. Le Virgulien et le Ptérocérien, seuls, n'ont pas exigé de maçonnerie. Le tunnel, dans son ensemble, a été voûté sur environ 2,000 mètres de long, tandis que, d'après les études géologiques, le revêtement n'avait été prévu que sur 800 mètres. La partie non voûtée a donc 1,260 mètres de long, soit 38 1/2 % du tout. Le cube moyen des maçonneries a été de $3^{m}20$ par mètre courant de souterrain.

La voûte a une épaisseur de $0^{m}30$ sur 1,425 mètres de long. — $0^{m}40$ sur 107 mètres, $0^{m}50$ sur 217 mètres et $0^{m}60$ sur 167 mètres.

Eaux. — Quant aux eaux on en a trouvé des quantités insignifiantes et elles n'ont gêné nulle part les travaux, sauf dans l'approfondissement d'un puits ainsi que je vais l'expliquer.

Le tunnel de la Gemmi devant traverser un massif appartenant au terrain jurassique, il me paraît utile de donner ici quelques détails sur l'allure des eaux dans les terrains de cette nature, car cette question a une grande importance.

Les roches calcaires qui forment les montagnes du Jura sont très poreuses, crevassées, et absorbent presque toutes les eaux tombant à leur surface. Celles-ci se rendent dans des cavernes et conduits souterrains très nombreux dans ces régions et qui, après avoir fait l'office de collecteurs, viennent déboucher au pied des montagnes et y produisent des

sources jaillissantes très abondantes qui constituent parfois des rivières.

Plusieurs des vallées supérieures du Jura sont complètement fermées et lorsque les eaux provenant de la fonte des neiges n'ont pas le temps de pénétrer dans le sol, elles trouvent une issue naturelle dans quelques-uns de ces canaux souterrains aboutissant à la surface et que dans le pays on désigne sous le nom d'*emposieux*.

Il résulte de ce qui précède que, si l'on perce un souterrain dans les calcaires jurassiques, on y trouvera très rarement de l'eau, même au point de contact de ces roches avec les marnes ; on ne trouvera l'eau que si l'on rencontre par hasard un des canaux souterrains dont on vient de parler.

Lorsque j'ai construit le chemin de fer du Jura Neuchâtelois, j'ai cependant admis avec les géologues qu'on devait trouver de l'eau en certaine quantité au contact des roches calcaires avec les marnes oxfordiennes dans le grand tunnel des Loges, surtout en considérant que ce point se trouvait à une profondeur de 292 mètres au-dessous du sol naturel. C'est par ces motifs que j'ai donné à ce tunnel une double pente à partir du point dont il s'agit, mais dans l'exécution on n'a pas rencontré les sources qu'on redoutait. On a rencontré, en échange, une source donnant 2 mètres cubes d'eau par heure, en creusant l'un des puits qui est dans la roche vive et dont la profondeur est de 226 mètres. C'est à 190 mètres du sol que l'eau a fait irruption et a causé ainsi un arrêt de sept mois dans l'approfondissement du puits, mais lorsqu'on a été en mesure d'épuiser les eaux et de

reprendre le travail, on a reconnu qu'elles coulaient dans un petit canal dont il a suffi de réunir les deux bouts pour qu'elles reprissent leur cours naturel sans nécessiter aucune dépense d'épuisement. On a dans ce fait un exemple en petit de ce qui se passe plus en grand pour toutes les rivières du pays.

On voit, par ce qui précède, que si le tunnel de la Gemmi reste tout entier dans les terrains jurassiques, il n'aura pas à redouter de grandes difficultés au point de vue des eaux. Il n'en sera probablement pas de même s'il atteint l'étage géologique du Trias, comme cela a eu lieu au Hauenstein, dont nous allons parler.

FRAIS DE CONSTRUCTION DU TUNNEL DES LOGES

Les tunnels du Jura neuchâtelois sont à une voie; l'excavation en rocher, sans revêtement, mesure 20 1/2 mètres cubes au mètre courant.

Puits. — On a creusé six puits espacés en moyenne de 500 mètres : leur écartement maximum était de 600 mètres. Ils avaient dans œuvre 2 mètres sur $3^{m}50$, soit une section de 7 mètres carrés. Ces puits avaient en moyenne 165 mètres de profondeur, le plus profond avait 226 mètres. Ils ont été payés à raison de 250 francs le mètre courant, et voici le détail de leur prix de revient au mètre cube dans les divers terrains traversés.

	NATURE DU TERRAIN		
	CALCAIRE	MARNES OXFORDIENNES	MARNES DU LIAS
	francs	francs	francs
Mineurs	15 40	9 58	7 98
Manœuvres	5 85	5 09	4 35
Chevaux au manège	5 80	4 69	3 25
Poudre et mèches	5 00	1 63	1 90
Outils	2 85	1 30	1 29
Câble du manège	1 40	0 78	0 86
Bois	2 45	5 64	4 54
TOTAUX	38 75	28 71	24 17

Galerie. — Les déblais ont été payés couramment aux prix suivants, dans la roche calcaire du tunnel :

1° Galerie d'avancement (cubant 9 mètres cubes le mètre courant), 20 francs le mètre cube, pour l'excavation seule.

Ce prix se compose des éléments suivants :

29 heures de mineur à 0 fr. 45	13 fr. 05
2 kilogr. de poudre à 2 fr. 20	4 40
Réparation de 25 fleurets à 0 fr. 10	2 50
TOTAL	19 fr. 95

2° L'élargissement complet ou abattage (cubant 11 1/2 mètres cubes), 7 francs le mètre cube, pour l'excavation seule. Ce prix s'établit comme suit :

10 1/2 heures de mineurs à 0 fr. 45	4 fr. 75
0 kilog. 70 de poudre à 2 fr. 20	1 50
Outils	0 75
TOTAL	7 fr. 00

3° Le mètre courant pour l'excavation totale en rocher revenait donc à 260 francs, chiffre rond, soit 12 fr. 70 le mètre cube. Ce prix ne serait plus que de 8 francs pour un tunnel exécuté à deux voies. Les prix ci-dessus ne comprennent qu'un transport en galerie de 100 mètres environ.

Dans les marnes oxfordiennes, le prix d'excavation pour la section entière a été de 6 francs environ, soit moitié du prix correspondant au rocher.

4° Au prix de 12 fr. 70, il faut ajouter — (*a*) la dépense faite pour l'excavation des puits et galeries transversales, qui a été de 80 francs par mètre courant de tunnel, soit 3 fr. 30 par mètre cube excavé en galerie, — (*b*) les frais de transport pour sortir les déblais par les galeries et les puits, soit 4 francs par mètre cube. — La moitié environ des déblais est sortie par les puits et coûtait en moyenne 6 francs par mètre cube. L'autre moitié sortie par les têtes ne coûtait que 2 francs de transport.

5° Additionnant tous ces chiffres on trouve que le mètre cube d'excavation de la galerie entière et en rocher est revenu à 20 fr. Le mètre courant de tunnel en rocher revient ainsi à 410 fr. Pour l'ensemble du tunnel qui renfermait des parties marneuses faciles à extraire, on n'a payé que 18 fr. par mètre cube, prix moyen s'appliquant à un cube moyen de 24 mètres par mètre courant, eu égard aux maçonneries, de sorte que le mètre courant a coûté réellement pour excavation et transport 432 francs.

La **maçonnerie** a coûté 50 fr. le mètre cube, soit, à raison de 3 mètres 20 en moyenne par mètre courant, 160 fr. le mètre courant.

En ajoutant aux chiffres précédents 50 fr. par mètre courant pour le bois fourni gratuitement par la Compagnie à l'entrepreneur et 58 fr. pour frais généraux, installations, etc., on arrive à un prix de revient de 700 fr. par mètre courant.

Les *petits Tunnels* du Jura neuchâtelois, au nombre de quatre, sont dans le terrain néocomien et ont coûté 600 fr. le mètre courant. Ce prix se décompose en général comme suit : excavation 350 francs, soit 28 mètres à 12 fr. 50 ; maçonnerie 240 francs, soit 7 ½ mètres à 32 francs.

3° TUNNEL DU HAUENSTEIN

Ce tunnel a 2,495 mètres de long et traverse les terrains suivants en partant de la tête sud : le Jura inférieur (Jura brun), 760 mètres ; le Lias, 300 mètres ; le Keuper, 300 mètres (ces trois terrains sans eaux) ; et enfin le Muschelkalk, 1,135 mètres (très aquifère).

On a ouvert trois puits ayant respectivement 162 mètres, 195 mètres et 125 mètres de profondeur, mais le second a dû être abandonné à une profondeur de 80 mètres à cause de l'abondance des eaux, de sorte que la profondeur totale des puits réellement exécutée n'a été que de 367 mètres qui ont coûté 205,000 francs, soit 560 francs le mètre courant. Dans le puits de 162 mètres qui traverse *l'oolithe inférieure*, l'avancement mensuel moyen a été de 16^{m}50. Dans les deux autres puits cet avancement n'a été que de 10^{m}50 à cause de l'abondance des eaux ou de la dureté du terrain (Muschelkalk).

Avancements.—Le tableau suivant donne les avancements mensuels qui ont généralement été obtenus dans les divers terrains :

NATURE DES TERRAINS	AVANCEMENTS MENSUELS			
	PETITE GALERIE		PUITS	
	MAXIMUM	MOYENNE	MAXIMUM	MOYENNE
	Mètres	Mètres	Mètres	Mètres
Marnes opalines.....	60	40	—	—
Lias.....	50	30	25	15
Muschelkalk.....	40	20	20	12
Marnes du Keuper...	42	22	—	—

Eaux. — Les eaux ont donné lieu à de grandes difficultés et retardé considérablement l'ouverture de ce souterrain, mais il convient de remarquer que ces difficultés ont été dues en grande partie à la pente unique (26 1/2 ‰) donnée au tunnel, et à ce fait que les eaux ont malheureusement été rencontrées dans le haut de cette pente, c'est-à-dire dans le Muschelkalk, ce qui a gêné considérablement les travaux et coûté de grandes dépenses pour les épuisements. Il est résulté de là que le souterrain commencé en mai 1854 et qui aurait pu être percé en janvier 1856, n'a été percé que le 31 décembre 1857, soit avec un retard de plus de dix-huit mois. Si le tunnel avait eu une double pente, les eaux auraient pu s'écouler naturellement vers les deux têtes et les inconvénients qu'on vient de signaler auraient été considérablement atténués.

Les eaux ont été ici de deux sortes, les unes ayant une température de 17° à 26° c., et fournissant 100 mètres cubes à l'heure, se sont présentées au point de contact du Muschelkalk avec le Keuper, sur une longueur de 120 mètres et à une profondeur de 225 mètres au-dessous du terrain naturel; leur quantité variait peu avec les saisons.

Les autres eaux sortaient, sur 500 mètres de long, des couches du Muschelkalk, qui étaient ici complètement bouleversées et brisées. Leur température n'était que de 12° c., et leur quantité a varié suivant les saisons, de 10 à 300 mètres cubes à l'heure; ce qui prouve qu'elles étaient d'origine très superficielle, tandis que les eaux chaudes, d'après leur degré de température, paraissent au contraire provenir d'une grande profondeur.

Le tunnel du Hauenstein comme celui des Loges, n'a pas rencontré de sources dans la région Sud où il traverse le terrain jurassique sur un kilomètre de long.

Maçonnerie. — Le cube des maçonneries a été relativement considérable et de 24,210 mètres, soit 9 1/2 mètres cubes en moyenne par mètre courant de tunnel. Le tunnel est voûté sur toute sa longueur, sauf 426 mètres ou 17 % du tout, dans le Muschelkalk.

Il y a 765 mètres avec voûte de 0m60 d'épaisseur; 634 mètres avec voûte de 0m48 et 598 mètres avec voûte de 0m39.

On a fait un radier sur 400 mètres de long dans les marnes à *ammonites opalines*. Ces marnes, qui renferment du mica, se trouvent à la limite du Jura brun

et du lias. Six mois après l'achèvement des maçonneries dans cette région, on remarqua que les pieds-droits s'étaient rapprochés de 0m15, au maximum, et que les joints s'écrasaient à la clef. Les ingénieurs ont supposé que cet accident provenait de ce que les marnes gonflaient sous l'action de l'air, mais le géologue Gressly pensait qu'il était dû à l'eau qui stationnait sur la plate-forme et avait ramolli le terrain. Ces mouvements furent complètement arrêtés par l'exécution d'un radier, auquel on donna d'abord 0m54 d'épaisseur, puis seulement 0m45. La voûte n'avait elle-même qu'une épaisseur de 0m60 à la clef.

Les voûtes ont une épaisseur uniforme, sauf celles ayant 0m60 à la clef, qui ont 0m75 aux naissances.

L'aqueduc placé dans l'axe du tunnel avait intérieurement 0m45 de large, sur 0m45 de haut et son radier était à 0m90 au-dessous du niveau des traverses.

FRAIS DE CONSTRUCTION DU TUNNEL DU HAUENSTEIN (1)

Le tunnel du Hauenstein a été construit pour deux voies, l'excavation a mesuré en moyenne 54 mètres cubes par mètre courant, y compris l'emplacement des maçonneries.

La petite galerie était placée à la base du tunnel; elle avait dans le rocher 2m70 de large sur 2m40 de haut.

(1) Les renseignements sur le Hauenstein sont généralement empruntés à la publication faite à Bâle en 1860 par MM. Pressel et Kauffmann, ingénieurs, qui ont dirigé l'exécution de ce tunnel.

Le mètre cube **d'excavation** du tunnel est revenu à 20 fr., comprenant : fouille 9 fr.; — transport des déblais, 3 fr.; — éclairage, 1 fr. 50; — boisage, 1 fr. 50; — répartition de la dépense faite pour ouvrir les puits, 1 fr. 50; — amortissement du matériel, 3 fr. 50. (1)

Le prix moyen pour fouilles (9 fr.) a varié de 5 à 27 fr., suivant la nature du terrain et l'abondance des eaux. Le prix de l'abattage par mètre cube était environ le tiers de celui de la petite galerie.

Le mètre courant d'excavation, y compris le transport des déblais, est donc revenu à 1,080 fr.

Le prix des **maçonneries** a été de 60 francs environ par mètre cube, soit pour 9 1/2 mètres cubes 570 francs par mètre courant de tunnel.

Aux deux sommes ci-dessus, il faut ajouter environ 250 francs de frais généraux, comprenant : 70 francs pour frais d'administration et surveillance; — 18 francs constructions diverses; — 55 francs pour intérêts de la valeur du matériel et du fonds de roulement; — 110 francs pour frais occasionnés journellement par les machines à vapeur, la ventilation et les épuisements. Ce tunnel, suivant MM. Pressel et Kauffmann, aurait donc coûté 1,900 francs le mètre courant. M. Brassey, grand entrepreneur anglais bien connu, qui s'était chargé d'exécuter ce souterrain pour le prix à forfait de 1,700 francs, aurait ainsi éprouvé une perte de 200 francs par mètre, soit au total 500,000 francs. Cette perte trouve sans doute

(1) L'outillage ordinaire, avec les voies et les wagons, valait 300,000 fr. Les machines à vapeur, manèges, ventilateurs, pompes et leurs accessoires avaient coûté 230,000 francs.

en partie son explication dans ce que nous avons dit des accidents et circonstances particulières qui se sont produits en cours d'exécution. L'entrepreneur a d'ailleurs considéré ces faits comme des cas de force majeure exceptionnelle, et réclamé une indemnité à la Compagnie.

III

DESCRIPTION

DES

GRANDS TUNNELS DES ALPES

Trois grands tunnels ont déjà été construits dans les Alpes, au Mont-Cenis, au Saint-Gothard et à l'Arlberg, mais on n'a pas sur leurs prix de revient des renseignements détaillés permettant d'apprécier exactement la valeur réelle des travaux de cette importance.

On ne trouve guère dans les revues scientifiques qui se sont occupées de ces tunnels que des chiffres donnés en bloc sans justification détaillée. On s'est d'ailleurs beaucoup plus occupé d'étudier les appareils mécaniques employés pour la perforation que des questions de dépenses qui sont cependant les plus importantes. Il y aurait donc une étude intéressante à faire pour rechercher dans quelle proportion la *longueur* des tunnels et la *vitesse* de leur percement augmentent le prix de ces ouvrages et quels sont les

frais spéciaux qu'il faut ajouter aux prix ordinaires des petits tunnels pour fixer rationnellement la valeur des grands souterrains tels que ceux du Simplon et de la Gemmi. C'est surtout en vue de cette étude, que j'ai réuni les renseignements que je publie aujourd'hui sur une dizaine de grands tunnels.

I° TUNNEL DU MONT-CENIS

Le tunnel du Mont-Cenis a une longueur de 12,220 mètres. Du nord au sud il présente une rampe de 22 °/₀₀ sur la moitié de sa longueur suivie d'une pente de 1/2 °/₀₀.

Les terrains traversés par ce tunnel sont, à partir de Modane (1) 128 mètres de terrains ébouleux; 1,967 mètres de terrain anthracifère supérieur. (Schiste argileux ou ardoise, grès quartzeux et schisteux, calcaire sschisteux.)

381 mètres de *quartzite* que M. de Lapparent (2) considère comme appartenant au grès bigarré et qui par sa dureté a beaucoup retardé l'avancement.

474 mètres de terrain calcaire plus ou moins pur divisé en quatre couches; 334 mètres anhydrite; 49 mètres schiste talqueux. — Ces trois derniers massifs formant une longueur de 858 mètres sont réunis généralement

(1) Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences du 4 juillet 1870, et du 18 septembre 1871, mémoire d'Elie de Beaumont.

(2) Traité de géologie 1885, page 895.

sous le titre de *calcaire gypseux*, ou de *grande masse calcaire* et considérés comme appartenant au trias.

8,885 mètres de *calcaires* mélangés de lits de schistes anthracifères argileux colorés en noir par du carbone, luisants et contournés. Ces schistes sont remplacés dans quelques régions par des schistes talqueux. — M. Elie de Beaumont dit que le *calcaire schisteux* est de toutes les roches alpines la plus facile à percer; il le considère comme appartenant aux marnes du lias (lias supérieur), et le sous-divise en trois groupes, savoir en partant de Modane:

1° Massif supérieur, 2,775 mètres, où abondent les lits de schistes argileux.

2° Massif moyen, 2,610 mètres, renfermant beaucoup de sable quartzeux, soit 14 à 25 %, de sorte que le calcaire de ce massif raie le verre. Ce sable est au contraire rare dans les deux autres groupes. Le schiste domine quelquefois dans ce massif.

3° Massif inférieur, 3,500 mètres. Le calcaire occupe ici plus de place que dans les deux groupes précédents, le sable quartzeux y est rare.

Toutes les couches de terrain traversées par le tunnel sont inclinées suivant un angle de 50° aussi bien sur l'horizon que sur la direction du tunnel, de sorte que leur épaisseur normale n'est au total que de 6991 mètres, soit environ les 6/10 de la longueur mesurée suivant la galerie.

Eaux. — Les infiltrations d'eau ont été à peu près nulles, dans le tunnel du Mont-Cenis et n'ont pas fourni en tout à chaque tête plus de 2 mètres cubes d'eau à l'heure.

Chaleur. — La chaleur de la roche n'a pas dépassé 29°6 c.

Maçonnerie. — On ne connait pas le cube des maçonneries exécutées, ni l'épaisseur qu'on leur a donnée dans les divers terrains traversés par le tunnel.

D'après M. Conte (rapport de 1863) la maçonnerie devait avoir partout 0m80 d'épaisseur et être formée de blocs équarris.

M. Revaux (*Mémoire des Annales des mines 1879*) dit que l'épaisseur du revêtement varie de 0m85 à 0m70, sauf dans les parties solides où elle est réduite de moitié environ.

On trouve dans les rapports des élèves ingénieurs de Turin, année 1868, les renseignements suivants : L'épaisseur du revêtement varie de 0m85 à 0m70 depuis le pied-droit à la clef sans pourtant que ces chiffres soient adoptés partout. Cette épaisseur a été réduite de moitié dans les roches solides. La plus grande partie de la maçonnerie est en pierre de taille ; on a cependant employé aussi de la brique.

Aqueduc. — D'après Figuier (*Nouvelles Conquêtes de la Science*) l'aqueduc était placé dans l'axe du tunnel ; il était voûté et avait 0m60 de large sur 1 mètre de haut, son radier était placé à 1m40 au-dessous du rail et ses pieds-droits avaient 0 m. 60 d'épaisseur.

Suivant M. Revaux (*Annales des mines 1879*), l'aqueduc avait une largeur de 0m90 et une hauteur de 0m70 sous la clef de voûte ; les pieds-droits avaient 0m50 d'épaisseur et le radier était placé à 1m20 sous le rail.

Voici ce que dit M. Conte au sujet de cet aqueduc *(Annales des Ponts et Chaussées, 1863)* :

« L'aqueduc avait été projeté avec une largeur de » 0m60 et une hauteur de 0m40. Il paraissait suf- » fisant et avait d'abord été construit avec ces dimen- » sions. Pendant l'avancement en petite galerie qui » dépasse de 200 mètres environ l'achèvement du » tunnel, on loge dans cet aqueduc les conduites d'air » et de gaz ainsi que le tuyau par lequel les pompes » de la machine vont aspirer l'eau des puits que l'on » ouvre par intervalle.

» Afin de laisser plus d'espace à l'aménagement de » ces tuyaux, on a porté les dimensions de l'aqueduc à » 1m20 de large sur 1 mètre de haut. — Un éboule- » ment étant survenu le 15 septembre 1862, les ou- » vriers occupés à l'avancement, au nombre de 60, » purent se sauver par cet aqueduc. »

Eclairage. — On avait installé le gaz pour l'éclairage des travaux mais on a dû y renoncer parce que les ouvriers ne voulaient pas observer les précautions qu'exige ce mode d'éclairage, et de plus ils détérioraient les appareils et s'obstinaient à conserver leurs lampes ordinaires.

L'**avancement moyen** par journée de 24 heures a été, pour les treize années qu'a duré le travail de percement (du 1er septembre 1857 au 25 décembre 1870), de 1m48 du côté de Bardonnèche et de 1m06 du côté de Modane.

L'avancement moyen par jour et par année a été au maximum de 2m44 du côté de Bardonnèche en 1870

et de 2m047 du côté de Modane en 1870; on a même atteint 3 mètres pendant quelques jours.

L'avancement mensuel maximum de la galerie de direction, a été de 90m60 en mai 1867 au côté sud, et de 91m30 en mai 1865 au côté nord.

Dans le banc de quartzite rencontré en 1863 à 2 kilomètres de Modane et qu'on a traversé sur 381 mètres, l'usure rapide des fleurets a réduit l'avancement quotidien à 0m60 et même par moment à 0m30, de sorte qu'on a mis près de deux ans pour traverser ce banc, soit du 15 juin 1865 au 7 mars 1867.

Avant l'application de la perforation mécanique, l'avancement quotidien n'avait été en moyenne que de 0m63 du côté Bardonnèche pendant trois ans et 0m47 côté Modane pendant cinq ans et demi; avec la perforation mécanique les avancements moyens ont été de 1m74 à Bardonnèche et 1m46 à Modane; les machines ont donc triplé la vitesse du percement.

On a percé 1,646 mètres courant à la main, savoir: 725 mètres au sud, du 14 novembre 1857 au 12 janvier 1861, et 921 mètres au nord, du 22 août 1857 au 25 janvier 1863. — On a percé mécaniquement 10,587 mètres, savoir: 6,355 mètres au côté sud, du 12 janvier 1861 au 25 décembre 1870, et 4,232 mètres au côté nord, du 25 janvier 1863 au 25 décembre 1870.

Par *mètre courant d'avancement* de la galerie de direction, on a obtenu en moyenne les résultats suivants pour les schistes calcaires et le quartzite (1):

(1) Mémoire du département fédéral des chemins de fer, 1886-87.

	TERRAINS	
	SCHISTE CALCAIRE	QUARTZITE
Nombre d'attaques..	1,25	3,14
Nombre de trous....	75	188,4
Profondeur des trous.	0m95	0m35
Poudre consommée..	25 kilogr.	63 kilogr.

Le tableau suivant donne l'avancement journalier dans les divers terrains traversés, à partir de Modane. Ce tableau a été dressé par M. le géologue Sismonda et publié dans le compte rendu des séances de l'Académie, du 4 juillet 1870 :

DÉSIGNATION des TERRAINS	LONGUEUR	DURÉE du PERCEMENT	Nombre de jours	Avancement journalier
	mètres			mètres
Éboulement	128	5 déc. 1857 — 25 avril 1858.	140	0.90
Schistes anthracifères.	1.967	25 avril 1858 — 15 juin 1865...	2.600	0 76
Quartzites	381	15 juin 1865 — 7 mars 1867.	625	0.63
Anhydrite	220	7 mars 1867 — 4 juin 1867..	87	2.53
Calcaire cristallisé.....	34	4 juin 1867 — 21 juin 1867..	17	2 »
Schiste talqueux	49	21 juin 1867 — 12 juillet 1867.	22	2.23
Calcaire cristallisé	22	12 juillet 1867 — 23 juillet 1867.	11	2 »
Anhydrite	30	23 juillet 1867 — 3 août 1867..	11	2.73
Calcaire schisteux.....	21	3 août 1867 — 13 août 1867..	10	2.10
Anhydrite	14	13 août 1867 — 20 août 1867.	7	2 »
Calcaire schisteux	397	20 août 1867 — 24 mars 1868	214	1.85
Anhydrite	70	24 mars 1868 — 25 août 1868..	150	0.47
Calcaire schisteux	8.885	25 août 1868 —	.....	....
TOTAL.....	12.218			

Pour compléter ces renseignements, voici les avancements faits annuellement pendant toute la durée des travaux. Le rapport de la Direction générale des Chemins de fer de l'Italie pour l'exercice 1872, contient un tableau qui donne l'avancement fait, mois par mois, au moyen de la perforation mé-

canique. C'est à ce document qu'ont été empruntés les chiffres du tableau suivant :

ANNÉES	CÔTÉ MODANE AVANCEMENT		CÔTÉ BARDONNÈCHE AVANCEMENT	
	ANNUEL	JOURNALIER	ANNUEL	JOURNALIER
	Mètres	Mètres	Mètres	Mètres
1857	10 80	0 088	19 28	0 425
1858	201 95	0 553	265 57	0 73
1859	130 »	0 359	236 »	0 645
1860	142 »	0 390	204 »	0 563
1861	193 »	0 532	170 »	0 468
1862	243 »	0 667	380 »	1 04
1863	376 »	1 030	426 »	1 17
1864	466 65	1 278	621 20	1 70
1865	458 40	1 256	765 30	2 10
1866	212 29	0 581	812 70	2 23
1867	687 81	1 884	824 30	2 26
1868	681 55	1 867	638 60	1 75
1869	603 75	1 654	827 70	2 27
1870	745 85	2 047	889 45	2 44
TOTAUX	5.153 05		7.080 10	
MOYENNES	384 19	1 085	541 65	1 51

La Galerie d'avancement a été percée à la base du tunnel ; ses dimensions ont beaucoup varié : elle avait au début des travaux $4^{m}40$ de large sur $2^{m}20$ de haut. — En 1861-62 elle avait 4 mètres sur 3 mètres. — De 1863-65 elle a $3^{m}40$ sur $2^{m}20$ ou $2^{m}40$. — En 1869 M. Revaux lui donne $2^{m}40$ sur $2^{m}50$ et dit qu'à 70 mètres en arrière de la tête on l'élargit de manière à lui donner $2^{m}40$ sur $3^{m}60$. La même année, la *Revue des Deux-Mondes* lui donne $2^{m}80$ sur $2^{m}60$

— Enfin, Figuier, dans les *Nouvelles Conquêtes de la Science*, année 1885, indique $2^{m}70$ sur $2^{m}60$.

La rencontre des deux galeries de direction a eu lieu avec une erreur ou écartement de $0^{m}30$ seulement.

Durée des travaux. — Les travaux commencés le 1er septembre 1857 n'ont été finis qu'à la fin de 1871 et ont ainsi duré quatorze ans. (Percement de la galerie le 25 décembre 1870. Inauguration le 17 septembre 1871.)

FRAIS DE CONSTRUCTION DU TUNNEL DU MONT-CENIS

1845. — M. Henri Maus, ingénieur belge, qui avait été appelé en 1845 par le gouvernement sarde, pour construire le chemin de fer de Gênes à Turin, fut également chargé avec le géologue Sismonda d'étudier la percée du Mont-Cenis. Son premier rapport sur ce sujet, daté du mois d'août 1845, proposait un tunnel de 10 kilomètres. A cette époque les machines perforatrices n'étaient pas encore connues, et on estimait qu'il faudrait 35 à 40 ans pour exécuter ce travail. Une pareille durée étant inadmissible, M. Maus commença à faire des expériences pour créer une machine perforatrice, et il en proposa une première en 1846.

1849. — En février 1849, M. Maus proposa un tunnel de 12,290 mètres de long ; il espérait percer la galerie de direction en cinq ans et exécuter le tunnel en dix ans. La force motrice devait être trans-

mise à la machine perforatrice par des câbles sans fin. M. Maus n'évaluait le prix du tunnel qu'à 14 millions, soit 1124 fr. le mètre courant, ce qui était une grande illusion.

Voici à ce sujet quelques détails empruntés au rapport fait par cet ingénieur, le 8 février 1849.

La galerie d'avancement devait avoir 4^m40 sur 2^m20.

Les installations hydrauliques et mécaniques, y compris les machines perforatrices, étaient évaluées à 680,000 francs pour le côté Modane, et à 600,000 francs pour le côté sud du tunnel.

Les dépenses journalières pour percer la galerie d'avancement étaient évaluées pour chaque tête du souterrain à 712 fr. 50, comprenant : 185 fr. 50 pour le personnel technique et les ouvriers occupés au travail souterrain ; 112 francs pour le personnel au jour chargé de réparer l'outillage et de surveiller les machines ; enfin 415 francs pour matières diverses, dont 180 francs pour acier.

Le percement devait se faire sans employer de poudre. La machine faisait dans la roche des entailles verticales et horizontales pour la diviser en tranches qui étaient enlevées au fur et à mesure au moyen de coins et de coups de masse. La machine n'occupait que la moitié de la galerie, soit 2^m20 de large, pendant qu'on enlevait les parties déjà taillées dans l'autre.

Maus comptait percer dès le début 3 mètres courant de galerie par jour, de sorte que le mètre courant ne devait coûter que 237 fr. 50. Il espérait même que l'avancement normal atteindrait plus tard 5 mètres à chaque tête.

Pour l'élargissement du tunnel ou l'abattage cubant

37m70 par mètre courant, le prix était fixé à 20 francs le mètre cube. Maus considérait ce chiffre comme un maximum, attendu que le prix ordinaire d'excavation n'était que de 15 francs dans les roches analogues.

Il supposait que la nature du terrain permettrait d'éviter toute dépense de muraillement et qu'on n'aurait pas d'épuisements à faire.

D'après ces données le tunnel devait coûter :

Installations.....	1.280.000 fr.
Percement de la galerie 12,290 mètres à 238 francs.....	2.925.020
Abattage 463,600 mètres cubes à 20 francs.....	9.272.000
Imprévu.....	327.922
TOTAL.....	13.804.942 fr.

Soit 1,124 francs le mètre.

La traversée des Alpes était évaluée au total à 35 millions, comprenant une longueur de 48 kilom. 855 mètres, savoir : le tunnel 12,290 mètres, la ligne d'accès au nord 2,500 mètres et celle au sud 34 kilomètres 065.

Une commission fut nommée par le gouvernement pour examiner le projet de M. Maus, et le 25 octobre 1849 M. Paleocapa, alors inspecteur du génie civil, fit à cette commission un rapport dans lequel il déclarait que le devis Maus était rationnel, mais trop faible comparativement à celui d'autres tunnels moins longs et placés dans des conditions ordinaires. Il faisait observer entre autre que le tunnel de Giovi, alors en construction sur la ligne de Turin à Gênes et ayant 3,255 mètres de long, soit le quart du Mont-Cenis, devait

coûter 4,000 francs le mètre courant. Il faisait remarquer cependant que le Mont-Cenis présentait plusieurs conditions favorables d'exécution, savoir :

1° Il n'y avait pas de puits à ouvrir ;

2° Les forces naturelles devaient remplacer la poudre et la main-d'œuvre ;

3° La nature de la roche permettrait de supprimer les boisages et les murailements ;

4° Il n'y aurait probablement pas d'épuisements à faire ni de sources pouvant gêner les travaux.

M. Paleocapa augmenta notablement le devis dressé par Maus et proposa le devis suivant :

Petite galerie.....	7.000.000 fr.
Elargissement ou abattage.....	13.900.000
Muraillement sur 2,000 mètres de long avec une épaisseur minimum de 0^{m}70 à 50 francs le mètre cube.....	2.100.000
TOTAL.....	23.000.000 fr.

Soit 1.846 francs le mètre courant.

M. Paleocapa considérait ce prix comme un maximum, attendu qu'il était basé, selon lui, sur les hypothèses les plus larges et les plus défavorables.

La commission, dans son rapport du 1er novembre 1849, approuva les propositions de M. Paleocapa et concluait qu'il y avait des probabilités pour faire des économies sur le devis présenté.

1852. — Les choses en restèrent là jusqu'en 1852 où le professeur Colladon, de Genève, proposa l'air comprimé comme force motrice et comme moyen d'aérer les travaux ; il sollicita à cet effet un brevet

le 30 décembre 1852. Voici ce que dit à ce sujet M. l'ingénieur Conte (voir *Annales des Ponts et Chaussées*, année 1863) :

« M. Colladon émet l'idée de faire agir les outils » de la machine Maus au moyen de l'air comprimé, » mais il n'indique ni une manière spéciale de com- » primer l'air ni le moyen de l'utiliser comme mo- » teur. »

1853. — MM. Sommeiller, Grandis et Grattoni, ingénieurs sardes, inventent une machine appelée *bélier compresseur*, destinée à appliquer la force des chutes d'eau à la compression de l'air.

Jusqu'en 1857, on travailla à perfectionner les appareils à compression et ceux de perforation.

1857. Commencement des travaux. — On croyait avoir enfin trouvé des machines satisfaisantes et le 17 août 1857, une loi accordait 41,400,000 francs pour exécuter la traversée des Alpes. Cette somme comprenait 26,800,000 francs pour le tunnel évalué à 2,200 francs le mètre courant et 14,600,000 francs pour l'exécution de 36 kilomètres de lignes d'accès.

Le 31 août 1857 on inaugura solennellement le commencement des travaux qui se poursuivirent à la main pendant qu'on construisait les installations mécaniques, mais ces appareils nouveaux ne purent être utilisés qu'après beaucoup d'expériences et de modifications ; c'est ce qui fit que la perforation mécanique ne commença réellement que le 12 janvier 1861, du côté de Bardonnèche, et le 25 janvier 1863, du côté de Modane. — Du côté de Bardonnèche ou

avança de 170 mètres seulement en 1861, de 380 mètres en 1862 et de 426 mètres en 1863. Dans cette même année 1863, on avança de 376 mètres du côté de Modane. Comme on le voit, pendant les trois premières années de l'application des machines on n'a guère fait plus de un mètre d'avancement de chaque côté par jour, tandis que pendant la dernière année des travaux on a fait 2^{m}08 à Modane et 2^{m}77 à Bordonnèche.

1861. — Un décret royal du 14 mai 1880 institua une commission chargée d'étudier le meilleur passage des Alpes suisses. Cette commission, dans son rapport du 9 avril 1861, a fixé dans ses divers devis estimatifs à 2,500 francs le prix du mètre courant de tous les grands tunnels considérés (Saint-Gothard, Splugen, etc.)

Juin 1861. Etude de M. Noblemaire. — La Compagnie du Nord de l'Espagne, désirant activer le percement du tunnel de Oazurza dont nous parlerons plus loin et qui était le travail le plus important de la traversée des Pyrénées, chargea M. Noblemaire, ingénieur des mines, d'étudier les appareils mécaniques employés au Mont-Cenis afin de voir si l'on pourrait utilement en faire usage dans les Pyrénées.

M. Noblemaire a rendu compte de ses études dans un rapport qui a été publié par la Société des ingénieurs civils (voir les mémoires de l'année 1861) et que M. Aug. Perdonnet a résumé dans son *Traité élémentaire des Chemins de fer*, 3^{e} édition, 1865.

Voici quelques-uns des faits constatés par M. Noblemaire *à Bardonnèche:*

La quantité d'air à comprimer par 24 heures, pour l'aérage et les perforations, était évaluée à 8,000 mètres cubes. La compression avait lieu à 5 atmosphères et réduisait ainsi les 8,000 mètres à 1,600 mètres. Cette compression exigeait une force théorique de 23 chevaux, représentée par une dépense réelle de force de 41 chevaux.

On disposait alors d'une force de 200 chevaux, qui permettait de comprimer 16,710 mètres cubes par 24 heures. En se servant de 5 compresseurs, et les faisant marcher à 5 coups par minute, on pouvait comprimer en 24 heures 46,400 mètres d'air avec une force de 234 chevaux.

La puissance motrice totale dont on pouvait disposer était à la rigueur de 900 chevaux.

La petite galerie avait 4 mètres de large sur 3 mètres de haut, dimensions qu'on pouvait, suivant M. Noblemaire, réduire à 3 mètres sur 2 mètres.

Sauf la grande conduite en fonte de 0^m20 de diamètre, toutes les autres qui distribuaient l'air aux machines étaient en caoutchouc recouvert de forte toile et avaient 0^m05 de diamètre et 3 millimètres d'épaisseur ; elles faisaient un excellent service.

En six heures on perçait 65 à 70 trous de mines de 0^m90 de profondeur. Deux heures étaient nécessaires pour le tirage des mines, et deux heures pour le déblaiement. La roche était brisée en morceaux qui ne dépassaient pas 3 à 4 décimètres cubes et par conséquent faciles à charger dans les wagons. On ne faisait à cette époque qu'un poste, soit douze heures de travail en vingt-quatre heures, et on assurait que

lorsqu'on ferait deux postes, on avancerait de deux mètres par jour.

Pour travailler en deux postes, on calculait qu'il fallait en tout 63 ouvriers, savoir : 28 dans la galerie d'avancement, 9 pour surveiller les compresseurs, 24 aux forges et ateliers de réparation et enfin deux ouvriers pour surveiller les canaux.

1862. Convention avec la France. — Après la guerre d'Italie (1859) et l'annexion de la Savoie (traité du 24 mars 1860), la France s'engagea à contribuer pour 19 millions de francs, à dater du 1er janvier 1862, à l'exécution du tunnel du Mont-Cenis. Cette somme s'appliquait à la moitié du tunnel située sur territoire français et estimée à 3,000 fr. le mètre courant, y compris la pose de la double voie, soit 2,900 fr. sans les voies. Voici ce que porte à ce sujet la convention internationale du 7 mai 1862 :

« ART. 3. — Le souterrain du Mont-Cenis sera » exécuté par les soins et sous la responsabilité du » gouvernement italien...

» ..... Les dépenses de la partie comprise entre la » tête d'entrée du côté de Modane et le milieu du » souterrain, seront à la charge du gouvernement » français...

» ART. 4. — La dépense à la charge du gouverne- » nement français pour le percement de la partie du » souterrain du Mont-Cenis située sur son territoire » est fixée à forfait à la somme de 19 millions de » francs, pour le cas où la durée des travaux serait » de 25 ans, à partir du 1er janvier 1862.

» Dans le cas où les travaux seraient complète-

» ment terminés avant ce délai de 25 ans, le capital » de 19 millions de francs sera augmenté d'une prime » de 500,000 francs pour chaque année entière, dont » le maximum de 25 ans aura été réduit.

» Si les travaux durent moins de 15 ans, la prime » sera portée à 600,000 francs pour chaque année » entière dont ce délai de 15 ans aura été réduit.

» ART. 5. — Le capital stipulé dans l'article qui » précède ne sera payé par le gouvernement fran- » çais, qu'après l'achèvement de tous les travaux du » souterrain, y compris la double voie.. ».

Au 1er janvier 1862, le tunnel n'était encore percé que sur 1,572m60, savoir : 894m85 du côté Bardonnèche et 677m75 du côté Modane; il restait donc 10,647m80 à percer. En accordant 25 années pour ce percement, on admettait implicitement que l'avancement journalier serait en moyenne de 0m60 à chaque tête. Ce chiffre se justifiait par le fait que dans l'année 1861, qui a précédé la convention, on n'avait avancé que de 0m468 du côté Bardonnèche où les machines perforatrices travaillaient cependant depuis le 12 janvier 1861, et de 0m532 du côté Modane, où l'on travaillait encore à la main. On ignorait sans doute à cette époque si les machines réussiraient et quelle vitesse elles permettraient d'imprimer aux travaux. On comprend donc que les gouvernements aient gardé une certaine réserve dans la convention qu'ils ont faite relativement à ces travaux.

Quant au prix de 3,000 fr. le mètre courant, il a dû être établi largement, car le gouvernement français, qui laissait toute la responsabilité du travail au gouvernement italien, ne pouvait pas lésiner sur ce prix.

La prime considérable qu'il a accordée pour activer ce travail, prouve d'ailleurs qu'il s'est montré généreux.

1863. Rapport Conte (*Annales des Ponts et Chaussées, 1863).* — Pour contrôler l'exécution des travaux, les deux gouvernements nommèrent une commission internationale qui, pour la France, était composée de MM. Busche, inspecteur général, et Conte, ingénieur en chef des ponts et chaussées. Ce dernier a publié dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, au commencement de 1863, un mémoire où il décrit la situation de l'entreprise du Mont-Cenis au mois d'août 1862, date où la commission avait fait une tournée d'inspection. — A cette époque la galerie d'avancement avait 4 mètres de large sur 3 mètres de haut : on y travaillait en deux postes qui occupaient chacun 15 mécaniciens. Il fallait beaucoup de temps pour dresser ce personnel spécial et lui faire acquérir la dextérité nécessaire pour que le travail avançât rapidement. L'inexpérience de ces ouvriers a fait que pendant assez longtemps on n'avançait pas plus avec les perforatrices qu'avec le travail à la main ; cependant à Bardonnèche où les machines fonctionnaient depuis 18 mois, la commission constata qu'on pouvait déjà avancer de 0^m80 à 0^m90 à chaque explosion ou attaque, soit de 1^m60 par jour de 24 heures ou 52 mètres par mois, mais l'avancement mensuel n'avait pas encore dépassé 35 mètres. On employait 6 heures au percement des trous et 4 heures pour charger et tirer les mines et enlever le déblai. — Avec l'avancement de 35 mètres, il aurait fallu 12 ans pour achever les

10,200 mètres du tunnel restant à percer, mais on espérait faire régulièrement trois attaques par 24 heures au lieu de deux et avancer ainsi de 50 mètres au moins par mois ce qui, permettrait de finir le travail en 8 ans 1/2. Pour obtenir ce résultat, on comptait sur une activité plus grande du personnel et sur un aérage meilleur qui permettrait un enlèvement plus rapide des déblais. La tête de la galerie d'avancement était en effet bien aérée par l'air comprimé, mais en arrière la fumée stationnait longtemps et gênait beaucoup les ouvriers chargés du déblaiement. Pour dissiper la fumée, on avait imaginé de l'attirer dans l'aqueduc central, mis en communication avec une cheminée et un ventilateur.

1863. Discussion à la Chambre italienne. — Le 4 mars, le gouvernement fit connaître à la Chambre la convention qu'il avait faite le 7 mai 1862 avec le gouvernement français, et donna à ce sujet les renseignements suivants :

L'aérage des travaux se faisait avec difficulté et n'était pas encore organisé d'une manière satisfaisante.

On espérait faire 800 mètres courant d'avancement par an, et finir ainsi le tunnel en 12 années 1/2, soit pour juillet 1875. En réalité, le tunnel a été percé le 25 décembre 1870.

Au mois de janvier 1863, il n'y avait encore que 720 ouvriers occupés à Modane et 900 à Bardonnèche.

Quant au prix de 3,000 francs payé par la France pour le mètre courant de tunnel, il résulte des explications très sommaires données par le gouvernement

que pour établir ce prix on s'est basé sur ceux des souterrains de la Nerthe et de Blaizy, en France, et sur celui de Giovi, près de Gênes. On a de plus pris en considération les augmentations de dépenses que la grande longueur du tunnel devait causer pour l'aérage et les transports souterrains. Quant à la prime annuelle de 500,000 francs, elle correspondait à l'économie que ferait la France sur les intérêts à payer pour les sommes dépensées par l'Italie dans les travaux. On trouve plus loin une description des tunnels de la Nerthe et de Blaizy, qui avaient coûté respectivement 2,256 francs et 2,195 francs. On a donc augmenté ces prix de 800 francs pour fixer celui du Mont-Cenis.

Le gouvernement n'a d'ailleurs fait aucune mention du prix de revient des travaux exécutés au Mont-Cenis depuis plus de cinq ans. Il semble cependant qu'on aurait dû puiser là les principaux éléments de discussion pour fixer le prix stipulé dans la convention internationale.

1863. Rapport de Sommeiller. — En avril 1863, la direction technique du Mont-Cenis adressa à la direction générale des Chemins de fer de l'Etat un rapport rédigé par Sommeiller et qui rendait compte de la situation de l'entreprise. Malheureusement, ce rapport, assez long et diffus, ne renferme aucun chiffre indiquant les dépenses faites, les prix de revient des travaux et l'estimation des dépenses à faire.

Ce silence est incompréhensible et fort regrettable. Il est probable qu'on avait quelques raisons secrètes pour ne pas renseigner exactement le public sur la situation

de l'entreprise. Voici les seuls renseignements utiles qu'on trouve dans ce rapport au point de vue de la question des dépenses.

A la fin de 1862, le Gouvernement n'avait encore dépensé que 12 1/2 millions pour ce travail. La galerie de direction n'était exécutée que sur 1275m25 du côté Bardonnèche et sur 920m75 du côté Modane; elle était percée à cette époque avec une largeur de 3m40 et une hauteur de 2m20, soit une section de 7m48.

Il y avait au front d'attaque de chaque galerie 37 ouvriers occupés à faire marcher la machine, sans compter les ouvriers qui chargeaient les mines et opéraient le déblaiement. On perçait 80 trous en moyenne par attaque, chaque trou avait 0m75 à 0m80 de profondeur. — Le chantier était éclairé au gaz. — Une attaque complète durait 13 heures 41 minutes, savoir pour la perforation 7 h. 39, pour charger et tirer les mines 3 h. 29, déblaiement 2 h. 33.

Pendant l'année 1862 on avait fait 325 journées utiles, 582 attaques et un avancement de 380 mètres. On avait consommé 18,622 kilogrammes de poudre, 76,510 mètres courant de mèche et 72,538 fleurets. On s'efforçait de faire couramment deux attaques par jour et on espérait en faire plus tard trois en 24 heures.

M. Sommeiller explique les augmentations de dépenses qui ont lieu sur les prévisions antérieures, par les raisons suivantes :

1° Le transport des matières à une grande hauteur. On payait par tonne de Suze à Bardonnèche 30 francs et d'une tête à l'autre à travers la montagne 75 à 85 francs. La chaux venait de fort loin, les machines venaient de Belgique et la houille d'Angleterre.

2° La nouveauté des machines, leurs imperfections, et l'inexpérience du personnel technique ont été la cause de grands frais pour les installations.

3° La nécessité de gagner du temps et d'apporter à chaque instant des perfectionnements qui souvent n'avaient que très peu de durée et étaient modifiés à leur tour.

4° Les logements et la nourriture étaient très chers, dans une contrée aussi isolée et à 1,300 mètres au-dessus de la mer. Il résultait de là un prix élevé pour la main-d'œuvre.

5° La nature de la roche qui présentait une composition hétérogène, des veines de quartz variables d'épaisseur et de direction, des couches contournées en tous sens et une résistance très inégale à l'action des fleurets.

6° La détérioration rapide des perforatrices. On estimait qu'il en faudrait 2,000 pour percer 10 kilomètres de galerie.

M. Sommeiller ajoute que pour faire avancer le travail et remédier aux retards qui ont eu lieu jusqu'alors, il est nécessaire de prendre les mesures suivantes :

1° Augmenter la force motrice.

2° Augmenter le cube d'air employé pour l'aérage.

3° Doubler la quantité d'air comprimé.

4° Augmenter le nombre de toutes les classes d'ouvriers et même doubler celui de certaines catégories.

5° Assurer aux ouvriers des logements et une nourriture à bon marché.

6° Avoir des machines parfaites et toujours en bon état afin de ne pas perdre de temps et de gagner ainsi la prime offerte par la France.

Au moyen de tous ces perfectionnements, la direction des travaux espérait obtenir une réduction sur la limite maximum de durée des travaux calculée par le général Ménabrea dans son discours à la Chambre le 4 mars 1863.

La direction des travaux dit enfin ce qui suit au sujet du prix de revient du tunnel :

« Le chiffre total auquel pourra s'élever le coût final » peut maintenant être calculé avec exactitude et ne » dépassera pas la somme de 4,000 francs par mètre » courant qui a servi de base à la convention française » en rappelant que la prime n'est autre chose que la » partie de ce coût qu'on a voulu faire varier en » raison inverse de la durée des travaux. Cette » somme de 4,000 fr. ne pourra être dépassée que » par suite de difficultés imprévues ou parce qu'on » ne tirerait pas des dépenses de main-d'œuvre et de » matières tout l'effet utile qu'on peut normalement » en obtenir. »

M. le professeur Colladon a fait au sujet du prix de 4,000 francs indiqué plus haut, les observations suivantes à la réunion des ingénieurs et architectes suisses des 2 et 3 octobre 1871 :

« Cette assertion de M. Sommeiller et ses associés » n'était pas, dit-il, accompagnée de preuves ni de » chiffres à l'appui, et ne peut être discutée ; cepen- » dant il est probable que dans cette affirmation si » différente de celle qui précède (3,000 francs), il » tenait compte d'une manière exagérée de tous les » premiers faux frais et des intérêts à un taux excessif » du coût des constructions des bâtiments et machines, » des canaux, etc. »

Le rapport de M. Sommeiller prouve combien on a erré et vécu au jour le jour dans l'entreprise du Mont-Cenis. On travaillait d'ailleurs en régie pour le compte du gouvernement et on se préoccupait peu sans doute de faire des économies, on pourrait même croire que la surveillance des travaux n'était pas très rigoureuse, puisque, en juin 1871, la voûte du tunnel s'est écroulée sur une grande longueur en ensevelissant sous ses décombres un certain nombre d'ouvriers.

1866. Commission d'étude. — En 1866, le gouvernement élabora un projet de loi intitulé : *Prime pour accélérer les travaux de la percée du Mont-Cenis*. Pour fixer le prix de cette prime, on chargea, le 26 août 1866, trois inspecteurs généraux du génie civil de rechercher le prix de revient des travaux déjà exécutés. Ce prix n'était pas encore connu exactement, car la comptabilité n'avait pas été organisée de manière à faire ressortir régulièrement le coût de chaque espèce de travaux. Les dépenses n'étaient soumises à aucune classification méthodique et se divisaient simplement, à ce qu'il paraît, en deux catégories comprenant, l'une les mains-d'œuvre ou feuilles de paye, et l'autre l'ensemble des matières fournies pour les travaux. Ce n'est donc que par des calculs assez compliqués et des formules empiriques qu'on a pu établir approximativement les prix de revient demandés. Ces prix sont résumés dans le tableau suivant et correspondent aux dépenses faites pendant l'année 1865, dans le chantier de Bardonnèche où l'on avait percé 815 mètres de galerie dans les calcaires schisteux dont 362 mètres étaient siliceux :

	PRIX DU MÈTRE COURANT		
	MAIN-D'ŒUVRE	MATIÈRES	TOTAUX
	Francs	Francs	Francs
Petite galerie.....	560	402	962
Abattage.....	1131	494	1625
Maçonnerie	325	635	960
TOTAUX.....	2016	1531	3547

Dépenses non classées.....	366
Trottoirs.....	50
Administration centrale.....	87
Consommation de perforatrices.....	153
TOTAL.....	4203

Pour le chantier de Modane la Commission a trouvé que le prix de revient était de 5,181 francs dans le *terrain anthracifère*, savoir : petite galerie 1,224 francs ; abattage 2,155 francs; maçonnerie 778 francs; dépenses non classées 734 francs ; dépenses diverses comme ci-dessus 290 francs.

Pour les *quartzites*, on a estimé que la petite galerie revenait à 3,769 francs le mètre courant et l'abattage à 7,004 fr., soit à plus du triple des prix relatifs au terrain anthracifère.

La commission a admis pour l'ensemble du tunnel un prix égal à la moyenne des deux sommes ci-dessus 4,203 fr. et 5,181 fr., soit 4,692 fr.

A la fin de 1865, il restait encore 6,840 mètres à percer et la commission a estimé que, pour cette section, le prix de 4,692 fr. devrait être augmenté de 150 fr. et porté ainsi à 4,842 fr.

Le chiffre de 150 fr. correspond à une augmentation d'environ 70 fr. pour chaque kilomètre d'avancement du tunnel à partir du point de départ. Il a été établi en supputant les diverses dépenses auxquelles donne lieu l'allongement d'un tunnel. Les calculs faits à ce sujet par la commission lui ont donné les chiffres suivants dont l'ensemble forme la somme de 70 fr., savoir : transport des déblais et matériaux 34 fr. ; transport des ouvriers 23 fr. ; frais supplémentaires d'aérage, 13 francs.

Il convient de relater à ce sujet, qu'en 1865, on dépensait à Bardonnèche 50,000 fr. par an pour les transports qui s'effectuaient au moyen de 100 wagons et de 18 chevaux. Cette somme ne comprenait que les dépenses d'entretien des wagons et celles des chevaux et de leurs conducteurs. La longueur du transport étant d'environ 2,500 mètres et la galerie ayant avancé de 815 mètres pendant l'année, on voit que la dépense pour transports n'a été que de 60 fr. par mètre courant de galerie, soit environ 1 fr. par mètre cube excavé. Ce chiffre est très modéré, mais on constatait que l'organisation de ce service était défectueuse et insuffisante.

1867. Marché avec Sommeiller. — Depuis leurs débuts, en 1857, jusqu'à la fin de 1867, le gouvernement italien fit exécuter les travaux en régie ; mais il traita le 11 décembre 1867 avec MM. Sommeiller et Grattoni pour terminer le tunnel avant le 1er janvier 1872, moyennant un prix à forfait de 4,617 francs le mètre courant. Ce prix est sensiblement égal à celui de 4,842 francs donné plus haut mais réduit de 5 %.

Il restait alors 4,373 mètres seulement à percer dans une roche qui, suivant les prévisions, était de bonne nature.

Ce traité avait pour but :

1° De hâter l'achèvement des travaux et de bénéficier ainsi de la forte prime accordée par le gouvernement français;

2° De mettre fin à des dépenses exagérées qui croissaient chaque année comme nous venons de le voir;

3° De rémunérer enfin par des prix avantageux les ingénieurs pour leurs inventions, attendu qu'ils n'en avaient pas encore été indemnisés quoique l'Etat en profitât.

Le gouvernement prêta, sans rétribution, tout le matériel d'exploitation et de construction à charge seulement d'entretien. Si le tunnel n'était pas terminé le 1er janvier 1872, soit dans un délai de quatre ans, les entrepreneurs encouraient une amende de 1,000 francs par jour de retard; par contre, ils recevaient 1,000 francs de gratification pour chaque jour économisé et, en outre, la moitié de la prime de 600,000 francs, due par la France pour l'année 1871 si elle était acquise. D'après cette convention, les entrepreneurs ne devaient faire, comme on le voit, qu'un avancement de 1^{m}50 par jour en moyenne à chaque tête, quoiqu'on eût fait dans le courant de la même année 1867 un avancement de 2^{m}26 à Bardonnèche et de 2^{m}175 à Modane. Les entrepreneurs ont donc eu une tâche facile et fort lucrative. — M. Colladon a exprimé l'opinion que le marché passé avec MM. Sommeiller et Grattoni *laissait à ces entrepreneurs quelques millions de bénéfices.* (Réunion des

ingénieurs et architectes suisses à Genève les 2 et 3 octobre 1871.)

Le décompte définitif de cette entreprise, dressé le 2 décembre 1872, s'est élevé à 27,259,528 francs, y compris 107,000 francs de primes pour 107 jours gagnés sur le délai fixé pour l'achèvement des travaux. Cette somme comprend non seulement les 4,373 mètres de tunnel non encore percés, mais aussi l'achèvement des diverses parties du tunnel en cours d'exécution au moment où l'entreprise commença à fonctionner ; elle comprend enfin les galeries de raccordements aux deux têtes payées à forfait au prix de 1,467,000 francs. (Voir le *Rapport de la Direction générale des Chemins de fer d'Italie pour l'exercice 1872.*)

Le tunnel ayant été percé le 17 septembre 1871, soit avec une avance de plus de 15 années, sur le délai prévu par la convention internationale du 7 mai 1862, la France a payé au gouvernement italien une prime de 8 millions de francs.

1868. Nouvelle Convention avec la France. — Le marché passé avec Sommeiller et les progrès déjà réalisés assurant l'achèvement du tunnel pour la fin de 1871, le gouvernement italien demanda à la France d'anticiper les paiements prévus par la convention du 7 mai 1862. (Voir *Rapport fait le 27 avril 1871 à la Chambre des députés du royaume d'Italie.*)

Le 3 février, il fut donc fait une nouvelle convention internationale suivant laquelle la France s'engagea à payer à l'Italie :

1° Le 15 juillet 1868, une somme de 7 millions acompte sur le forfait de 19 millions.

2° Le 15 juillet des années suivantes, le montant des travaux exécutés dans l'année précédente.

3° La somme totale à payer par la France fut en échange réduite de 900,000 fr.

La France a ainsi payé à l'Italie :

Intérêt du 1er janvier 1862 à fin juin 1868	1.490.107 50
Le 15 juillet 1868	7.000.000 »
Le 15 juillet 1869	2.793.500 »
Le 15 juillet 1870	2.986.500 »
Le 15 juillet 1871	6.220.000 »
Primes pour 10 années à 500,000	5.000.000 »
Primes pour 5 années à 600.000	3.000.000 »
TOTAL	28.490.107 50
A déduire 900.000 fr	900.000 »
Reste, somme réellement payée par la France	27.590.107 50

(Rapport de la Direction générale des Chemins de fer de l'Italie, exercice 1872.)

Résumé des évaluations successives. — Voici, en résumé, les divers prix auxquels le tunnel du Mont-Cenis a été successivement évalué :

En **1849**, il est évalué à 1124 francs le mètre courant par l'ingénieur Maus et à 1,846 francs par Paleocapa et la commission chargée d'examiner le projet Maus.

En **1857**, à 2,200 fr. par le gouvernement sarde, loi du 17 août 1857.

En **1861**, à 2,500 fr. par la commission chargée d'étudier les passages des Alpes suisses.

En **1862**, à 2,900 francs par la convention avec la France.

En **1863**, à 4,000 francs par M. Sommeiller et ses associés. (*Rapport du mois d'avril.*)

1866. — Une commission d'études trouve qu'en 1865 le tunnel a coûté 4,203 francs le mètre courant à Bardonnèche dans les calcaires schisteux, et 5,181 francs à Modane dans les terrains anthracifères.

En **1867** (11 décembre), le gouvernement italien adjuge les 4,373 mètres restant à percer à MM. Sommeiller et Grattoni pour le prix de 4,617 francs le mètre courant.

Il paraît résulter des chiffres et des faits qui précèdent, que le souterrain du Mont-Cenis aurait pu être construit (non compris les intérêts) pour le prix de 2,900 francs le mètre courant, prix admis par les gouvernements intéressés.

Quelques écrivains ont dit que ce tunnel avait coûté en tout 75 millions et par conséquent 6,140 francs le mètre courant; mais il y a ici une grave erreur résultant de ce que cette somme comprend non seulement le tunnel, mais encore 36 kilomètres de chemin de fer considérés comme faisant partie de la *traversée des Alpes*.

1872. Coût définitif. — Le rapport de la Direc-

tion générale des Chemins de fer de l'Italie pour l'exercice 1872 donne, comme suit, les sommes consacrées annuellement par le gouvernement à la traversée des Alpes :

ANNÉES	SOMMES	ANNÉES	SOMMES
1857	1.000.000	*Report* ..	22.700.000
1858	3.500.000	1865	5.500.000
1859	500.000	1866	5.500.000
1860	2.500.000	1867	7.000.000
1861	3.000.000	1868	9.000.000
1862	2.000.000	1869	12.500.000
1863	3.500.000	1870	12.500.000
1864	6.700.000	1871	4.300.000
A reporter	22.700.000	TOTAL ...	79.000.000

Il fallait ajouter à cette somme environ 450,000 fr. pour solder le compte de l'entreprise Sommeiller, et en déduire 10,176,907 fr. dépensés sur la ligne d'accès. Il restait ainsi 69,274,000 fr. réellement dépensés pour le tunnel, soit 5,650 fr. par mètre courant, mais il faut encore déduire de ce chiffre : 1° La valeur du matériel vendu, soit au Saint-Gothard, soit à diverses personnes ; 2° la valeur des terrains et bâtiments occupés pendant l'exécution des travaux ; 3° le prix de la double voie. — En tenant compte de ces éléments, on arrive à fixer définitivement le prix de

revient du tunnel du Mont-Cenis au chiffre de 5,400 francs.

Ce chiffre de 5,400 fr. est fort élevé, mais il s'explique facilement :

1° Par les diverses raisons qu'a données M. Sommeiller (voir page 59) ;

2° Par toutes les études et expériences coûteuses qui ont été faites à chaque instant en vue de ce grand travail ;

3° Par les fausses manœuvres nombreuses et les dépenses exagérées auxquelles a nécessairement donné lieu une entreprise *poursuivie pendant dix ans en régie aux frais du gouvernement ;*

4° Par la grande durée des travaux, soit 20 ans pendant lesquels les frais généraux se sont accumulés et ont notablement grossi les dépenses ;

5° Par la prime accordée aux ingénieurs pour les récompenser de leurs inventions.

Le tableau ci-dessus fait d'ailleurs voir que l'activité des chantiers a presque doublé à partir de 1868, où les travaux ont été remis à un entrepreneur. Cette activité exceptionnelle n'a évidemment pu être réalisée qu'en faisant des sacrifices d'argent considérables, qui justifient en partie le prix si élevé (4,617 francs), accordé à l'entrepreneur pour regagner le temps perdu pendant les années précédentes.

Matériel et Installations. — M. Meyer, dans sa brochure de 1888, page 11, s'exprime comme suit au sujet des frais de construction du tunnel du Mont-Cenis :

« On n'a que peu de renseignements au sujet

» du coût de ce tunnel. On sait qu'à l'origine les tra-
» vaux furent commencés en régie, on estime à
» 3,400,000 francs les installations mécaniques faites
» pendant cette période : béliers, compresseurs, pom-
» pes, bâtiments, captage d'eau, et conduites d'air. »

On trouve d'autre part, dans un guide de Turin à Chambéry, publié en 1871 par Covino, que Grattoni, l'un des ingénieurs du Mont-Cenis, avait estimé en 1865, à 3 millions la valeur des *installations nécessaires pour un chantier normal.* Cette somme comprenait grosso-modo :

Terrains.....	100,000 fr.
Maisons pour loger 1,000 ouvriers et le personnel. — Hôpitaux.....	466,000
Bâtiments pour magasins divers, écuries, etc.....	144,000
Places et chemins divers.....	155,000
Usine à gaz.....	25,000

INSTALLATIONS MÉCANIQUES

1° Canaux.....	250,000	
2° Edifices pour machines et ateliers.....	365,000	
3° Compresseurs et moteurs hydrauliques...	480,000	1,455,000 fr.
4° Cinq réservoirs	160,000	
5° Conduite d'air extérieure	.60,000	
6° Outillage des ateliers.	140,000	
A reporter.....		2,345,000 fr.

	Report.....	2,345,000 fr.
7° Ustensiles divers, robinets, indicateurs...	40,000	655,000
8° Perforatrices, tuyaux divers. — Rails, wagons, matières en magasins.....	615,000	
	TOTAL.....	3,000,000 fr.

M. Grattoni évaluait donc à 6 millions au total les installations nécessaires aux deux têtes pour percer le tunnel avec des machines.

Ces évaluations de Grattoni se trouvent également consignées dans les notices publiées par les élèves de l'école du génie de Turin, année 1868.

Voici comment M. Noblemaire, déjà cité, a évalué approximativement, en 1861, les dépenses d'installations faites à Bardonnèche où la perforation mécanique avait commencé le 12 janvier de cette même année 1861 :

1° Dix compresseurs mis en place à 120,000 francs.....	1,200,000 fr.
2° Double conduite d'air de 0^m20 de diamètre et 12,000 mètres de long en tout (épaisseur de la fonte 0^m01), à 20 francs le mètre courant mis en place.....	240,000
3° Transport de ce matériel de Seraing à Bardonnèche, 720 tonnes à 80 fr.	57,600
A reporter.....	1,497,600 fr.

Report.....	1,497,600 fr.
4° Cinquante perforatrices à 200 fr. l'une.....	100,000
5° Affûts, robinets, tuyaux en caoutchouc.....	30,000
6° Canaux avec réservoirs d'épuration 3 kilomètres.....	50,000
7° Bâtiments des compresseurs et ateliers.....	50,000
8° Outillage des ateliers, forges.....	13,000
TOTAL.....	1,740,600 fr.

Ce chiffre est inférieur de 369,400 francs à celui donné plus haut et établi par Grattoni en 1865.

M. Noblemaire observe que les dépenses pour compresseurs qui sont les plus importantes, avaient été notablement réduites dans les installations plus récentes de Modane, où l'on avait imaginé des appareils plus simples.

C'est en 1863 seulement que les *Béliers compresseurs* furent remplacés à Modane et à Bardonnèche par des pompes à compression *à piston liquide*.

Prolongement du tunnel du Mont-Cenis sur 1,575 mètres. — Comme complément des renseignements qui précèdent, voici quelques chiffres empruntés à la *Revue générale des Chemins de fer* de juin 1881, où M. Michel, ingénieur de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée, a rendu compte des travaux faits en 1880 et 1881 (1) pour

(1) M. Meyer, dans la brochure qu'il a publiée en 1888, fait erreur (page 8), en plaçant ces travaux à la date de 1873-1876.

modifier l'entrée du tunnel du Mont-Cenis du côté de Modane. La Compagnie a fait sur ce point un tunnel à deux voies de 1,575 mètres de long, traversant des roches très dures, telles que schistes chloriteux et grès anthracifère.

La galerie d'avancement, cubant 7 mètres par mètre courant, a été percée avec la machine Ferroux. Chaque mètre d'avancement exigeait 12 trous de 1 mètre à 1m20 de profondeur et 12 kilogrammes de dynamite. Le percement exigeait quatre heures et le déblaiement autant. Quatre perforatrices travaillaient ensemble avec douze ouvriers. On faisait 3 mètres à 3m50 d'avancement par jour.

Les installations mécaniques (turbines, compresseurs, réservoirs, machines perforatrices, tuyaux, etc., etc.) ont coûté 145,000 francs.

Le mètre cube de galerie d'avancement a coûté : pour main-d'œuvre, 12 fr.; dynamite, 15 fr.; répartition des dépenses pour installation mécanique, 14 fr.; pour faux frais et bénéfices, 4 fr. Total : 45 francs.

L'abattage du stross fait à la main revenait à 16 fr. le mètre cube, l'ensemble de ces dépenses donne un prix moyen d'environ 20 fr. par mètre cube, soit 1,100 fr. par mètre courant d'excavation. En ajoutant à ce chiffre 600 fr. pour les maçonneries et 300 fr. pour frais accessoires, benéfices, etc., on trouve que ce tunnel a coûté normalement 2,000 fr. le mètre courant.

Il convient de remarquer qu'on a donné de fortes dimensions aux maçonneries puisqu'elles ont au minimum 0m60 d'épaisseur dans les terrains de rocher

Dans le terrain glaciaire on a donné 1 mètre d'épaisseur et fait un radier.

M. Meyer dit dans sa brochure de 1888 que cette nouvelle galerie a coûté 4,393,000 francs à la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée, d'où on pourrait conclure que le mètre courant est revenu à 2,800 francs ; mais il faut observer que cette somme comprend entre autres dépenses : 1° l'exécution sur 200 mètres de long d'une tranchée dans des terrains glaciaires très inclinés qui ont exigé de grandes dépenses de consolidation ; — 2° le raccordement avec l'ancien tunnel sur 85 mètres de longueur environ, raccordement qui a coûté près de 7,000 francs le mètre courant par suite des difficultés et sujétions résultant du service de l'exploitation.

2° TUNNEL DU SAINT-GOTHARD

Le tunnel du Saint-Gothard a 14,984 mètres de long. — A partir de la tête Nord, il y a une rampe de 5,82 °/₀₀ sur 7,822 mètres, un palier de 319 mètres, une pente de 5 °/₀₀ sur 2,273 mètres, une pente de 2 °/₀₀ sur 3,793 mètres et une pente de 1 °/₀₀ sur 972 mètres.

Nature du terrain. — Le rapport trimestriel du Conseil fédéral huitième volume (1er octobre 1879 au 30 septembre 1880) contient, à la date de juillet 1880, un rapport avec profil en long rédigés par M. Stapff, géologue attaché à la compagnie du Saint-

Gothard et qui décrit la nature des roches rencontrées dans le percement du tunnel. M. Stapff divise le tunnel en quatre régions à partir de Gœschenen, savoir :

1° **Le massif du Finsteraarhorn,** de 2,010 mètres de longueur, composé de gneiss granitique et comprenant sur 417 mètres d'épaisseur (de 1,100 mètres à 1,517 mètres) un gneiss particulier distinctement schisteux et renfermant moins de quartz mais plus de feldspath et de mica noir que le gneiss granitique. — L'avancement quotidien était de 3m80 dans ce gneiss schisteux, tandis que dans le gneiss granitique il n'a été que de 2m10 au nord et de 2m90 au sud du gneiss schisteux.

2° **Le massif d'Urseren** (Andermatt) occupe entre les kilomètres 2k010 et 4k325, une longueur de 2,315 mètres. Il est composé de gneiss avec des couches quartzeuses et forme un bassin présentant des plissements très importants et renfermant beaucoup de fissures et crevasses remplies d'argile. Il comprend divers terrains qu'il convient de signaler, ce sont :

a) — Entre les kilomètres 2k582 et 2k784, soit sur 202 mètres, une couche de **cipolin** (calcaire mélangé de pétrosilex) entourée de **schiste noir argileux et décomposé** ayant 11 mètres d'épaisseur au nord et 18 mètres au sud du cipolin. Une couche de ce schiste ayant 21 mètres d'épaisseur est intercalée en outre dans la masse même du cipolin.

Le cipolin a donné de fortes infiltrations d'eau

produisant 100 mètres cubes à l'heure (1) et renfermant un peu de fer et surtout du gypse et du chlorure de magnésie. Le schiste, au contraire, était presque sec.

Le cipolin paraît appartenir à l'étage jurassique et le schiste noir au terrain du lias.

Le percement du cipolin a été facile, car en octobre 1875, quand on le traversait l'avancement de la galerie a été de 127m50.

b) — Entre les kilomètres 2k784 et 3k208, soit sur 424 mètres, on trouve le *gneiss dit d'Urseren*.

Immédiatement à la suite du schiste noir précédent et sur 72 mètres de longueur, soit du kilomètre 2k784 à 2k856, le gneiss d'Urseren est complètement décomposé et transformé en argile renfermant de la calcite, du feldspath kaolinisé et des amas de quartz en poudre. Cette couche spéciale d'argile remplit une crevasse *ou faille avec rejet* qui apparaît à la surface du sol où elle forme le *couloir de Kôhlertgraben*. Cette argile gonfle avec l'eau et se transforme même en boue. Elle a causé de grandes difficultés dont nous parlerons plus loin.

Pendant les mois de décembre 1875 et janvier 1876, où l'on a traversé ce *mauvais terrain*, l'avancement n'a été en moyenne que de 35 mètres par mois, car la nécessité de boiser retardait beaucoup le travail qu'on a dû faire tout entier à bras. La perforation mécanique a été suspendue et n'a pu être reprise qu'au kilomètre 2k856.

c) — Entre les kilomètres 3k208 à 3k692, il existe un

(1) Dans la *Revue générale des Chemins de fer* (mars 1882), M. Slockalper dit qu'on a trouvé 60 litres d'eau par seconde, entre les kilomètres 2k600 et 3k000.

schiste à Séricite (variété de mica) ayant l'aspect du micaschiste et composé de quartz et feldspath avec un peu de calcaire. Ce massif renferme plusieurs couches de schiste noir dont les plus puissantes n'ont que 2 à 3 mètres d'épaisseur.

3° **Massif du Gothard.** — Du kilomètre 4ᵏ325 à 11ᵏ742, soit 7,417 mètres de longueur.

Ce massif est composé de gneiss de diverse nature et présente ***plusieurs failles avec rejet.***

Du kilomètre 4ᵏ870 à 5ᵏ310, soit sur 440 mètres, on a trouvé une couche de *Serpentine* très difficile à excaver et à débiter et où l'avancement mensuel n'a été que de 75 mètres. Cette roche, composée essentiellement de silicate magnésien, n'est pas très dure, mais elle est tenace et d'une structure massive. Elle a exigé 30 à 35 kilog. de dynamite par mètre courant de galerie de direction, soit 4 kilogrammes par mètre cube, tandis que la consommation moyenne, dans cette galerie, n'a été que de 21 kilog. 6 par mètre courant pour l'ensemble du tunnel.

Quelques couches du massif du Gothard sont *amphiboliques* et ont présenté les terrains les plus difficiles à excaver ; c'est ainsi qu'au kilomètre 6ᵏ179, on a employé en un jour 363 fleurets pour traverser une couche amphibolique de 0ᵐ90 d'épaisseur. Malgré cette grande dureté, on a été obligé de voûter le tunnel dans ce terrain, parce qu'il est fissuré et se détache sous forme de coins aigus.

4° **Région du Tessin.** — Du kilomètre 11ᵏ742 à 14ᵏ920, longueur 3,178 mètres. Cette région comprend

essentiellement des micaschistes de diverses espèces. Les schistes amphiboliques ont dominé sur 565 mètres de longueur entre les kilomètres 11ᵏ770, et 11ᵏ335 et retardé l'avancement qui n'a été au maximum que de 1ᵐ565 par jour (juin-août 1876).

Il y a également dans cette région de nombreuses failles peu puissantes et remplies d'argile et débris de roches encaissantes ; ces failles ont beaucoup plus gêné l'avancement des travaux que les roches dures.

Les massifs 2°, 3° et 4° sont considérés comme représentant des dépôts sédimentaires métamorphisés.

A titre de document historique, voici les renseignements que la Compagnie a donnés aux entrepreneurs sur la nature des terrains que devait traverser le tunnel (extraits de l'annonce en date du 5 avril 1872 insérée dans les journaux) :

« Suivant les indications de personnes compétentes » le tunnel traverse dans sa direction de nord à sud » les formations géologiques suivantes :

» Gneiss granitique sur une longueur de 1,875 mè- » tres. — Gneiss 360 mètres. — Schistes noirs et » verts, marbre, schistes granitiques 2,790 mètres. — » Gneiss granitique 3,750 mètres. — Gneiss 465 mè- » tres. — Gneiss granitique 2,300 mètres. — Gneiss » et micaschiste 1,415 mètres. — Amphibolite et » schistes granatifères 1,195 mètres. — Dolomie et » gypse 650 mètres. »

DIFFICULTÉS RENCONTRÉES DANS LE TUNNEL DU SAINT-GOTHARD

On a rencontré dans le souterrain du Saint-Gothard trois difficultés importantes (1).

Les eaux. — L'une a consisté dans l'abondance

(1) A ces trois difficultés on pourrait en ajouter plusieurs autres auxquelles il est inutile de s'arrêter, attendu qu'elles sont d'ordre secondaire, ce sont, entre autres :

1° L'insuffisance de la force motrice hydraulique à la tête sud, ce qui a obligé l'entrepreneur à faire de grands frais pour aller prendre cette force à 3,000 mètres de distance des travaux. — A l'embouchure sud du tunnel du Mont-Cenis, on a également construit un canal de 3,000 mètres pour amener l'eau motrice aux machines.

2° La rencontre de gneiss granitique très dur près de Goeschenen.

3° La crise financière que la Compagnie a éprouvée en 1876 en découvrant une insuffisance de 100 millions dans les devis. Cette crise a duré jusqu'en 1879.

4° Le changement fréquent des directeurs de la Compagnie, qui furent successivement M. Gerwig, du 2 avril 1872 à 1875, soit pendant trois ans. — M. Hellwag (danois), jusqu'au 31 décembre 1878, soit encore trois ans. — N. Gehrlich (intérim pendant 6 mois). — Enfin M. Bridel, du 30 juillet 1879 jusqu'à l'achèvement en 1882, soit pendant deux ans et demi. — Le 27 juillet 1878, M. Escher quitte la Compagnie, et le personnel qui était à Zurich va à Lucerne.

5° La mort prématurée de l'entrepreneur L. Favre, le 15 juillet 1879, soit deux ans et demi avant l'achèvement des travaux.

6° La grève des ouvriers, en juillet 1875.

7° L'incendie d'Airolo le 17 septembre 1877. Cet incendie a causé à la population une perte évaluée à environ quatre millions de francs, dont moitié seulement couverte par les assurances, il y a eu 143 maisons et 27 écuries brûlées.

8° L'épidémie d'ankylostomes qui sévit sur les mineurs pendant la dernière année qui a précédé le percement de la galerie d'avancement.

9° On a signalé plusieurs explosions de dynamite, et entre autres quatre à Airolo pendant les années 1873 et 1874, et quatre également à Goeschenen, dont deux en 1877, qui ont tué sept ouvriers.

extraordinaire des eaux qui ont envahi le souterrain près de la tête sud. A 200 mètres environ de cette tête on avait déjà 270 mètres cubes d'eau à l'heure. En mars et en septembre 1873 on en a eu 700 mètres cubes. Pendant l'année 1874 le cube d'eau a atteint 876 mètres cubes et l'avancement pour cette année n'a été que de 747 mètres. Le débit maximum des sources a été de 1,260 mètres cubes par heure le 28 juillet 1875 ; la galerie avait alors 2,092 mètres de long à partir d'Airolo. C'est en mars et avril que les sources étaient le plus faibles et en septembre, octobre qu'elles étaient le plus fortes. Elles ont surtout été abondantes dans les quatre régions suivantes, savoir: à 1,000 mètres — 1,200 mètres, 2,100 et 2,500 mètres de la tête. Ces points correspondaient d'ailleurs à des bassins aquifères connus à la surface du sol et qui ont tari par l'ouverture du tunnel (1). Le débit des infiltrations a diminué avec le temps, à mesure que les eaux accumulées dans l'intérieur de la montagne se sont écoulées. C'est ainsi que lorsque la galerie de direction est arrivée à 3,800 mètres de la tête, au commencement de 1877, le total des infiltrations ne produisait plus que 658 mètres cubes. — La *température* des eaux à la sortie du tunnel était de 12° à 14° c. ; le minimum correspondait aux mois d'avril, mai, juin.

A la tête nord, la quantité d'eau due aux infiltra-

(1) Au tunnel du mont Hoosac (Etats-Unis), qui a 7,634 mètres de long, on considéra comme un grave obstacle un volume d'infiltration de 65 mètres cubes à l'heure. Ce tunnel, le plus long des Etats-Unis, a été terminé en 1874 et a coûté plus de 6,100 fr. le mètre courant.

tions n'a pas dépassé 126 mètres cubes à l'heure, avec une température moyenne de 18° c.

Chaleur. — La seconde difficulté à laquelle on n'avait pas songé, à ce qu'il paraît, est résultée de la chaleur souterraine. La température de la roche s'est en effet élevée à 30°,8 c. sur près de 4 kil. de long, et elle s'est élevée à 34° dans les chantiers où travaillaient les ouvriers, ce qui, a-t-on dit, les rendait malades, et aurait été pour l'entrepreneur une cause de dépenses exceptionnelles évaluées à un million et demi de francs par MM. les ingénieurs Schlemmer et Meyer, qui faisaient partie des experts nommés dans le procès entre la compagnie du Gothard et l'entrepreneur L. Favre.

La maladie des ouvriers du Saint-Gothard a été l'objet d'une étude spéciale de la part de M. Raphael Blanchard, qui a traité cette question intéressante dans une conférence sur les *ennemis de l'espèce humaine*. Cette conférence a été reproduite dans le n° du 5 mai 1888 de la *Revue scientifique*, où on lit ce qui suit :

« Lors du percement du tunnel du Saint-Gothard, » une épidémie meurtrière s'abattit sur les ouvriers: » par centaines, ils étaient frappés d'anémie, les » hôpitaux de la Suisse et de la haute Italie regor- » geaient de malades, parmi lesquels la mort fauchait » une proportion considérable de victimes; les survi- » vants restaient longtemps débilités et de longs mois » leur étaient nécessaires pour recouvrer leurs for- » ces. La cause de cette anémie demeura inconnue » jusqu'au jour où, en 1879, le Dr Graziadei eut ren-

» contré un grand nombre d'*ankylostomes* dans » l'intestin d'un ouvrier du Saint-Gothard, dont il » faisait l'autopsie. C'était donc encore à ces vers » minuscules qu'il fallait attribuer cette terrible épi- » démie qui, en quelques mois, avait fait tant de » victimes !

» C'est encore par l'eau, et par l'eau seule, que » cet hôte redoutable nous envahit. Dans une agglo- » mération ouvrière, travaillant dans des conditions » particulières que nous allons indiquer, il suffit d'un » individu contaminé, même très modérément, pour » infester presque à coup sûr la population tout » entière. Tel a été le cas, à n'en pas douter, pour » l'épidémie du Saint-Gothard.

» Qu'un individu porteur du parasite travaille dans » la mine, ses déjections qu'il abandonne le long des » galeries, sont bientôt mélangées à la boue, dans » laquelle les œufs donnent promptement naissance » à des embryons. Les ouvriers déposent à terre » leurs vêtements, leur pipe, divers autres objets » qu'ils auront l'occasion de porter à leur bouche ; » l'heure du repas venue, ils s'asseyent sur le sol, y » posent leur pain, leur fourchette, leur couteau, le » verre ou la bouteille dans lesquels ils boivent, etc. » et ont ainsi des occasions sans nombre d'avaler le » parasite avec la boue qui souille tous ces objets. »

Les ouvriers du Saint-Gothard ont donc éprouvé sous sa forme épidémique la maladie que M. Blanchard appelle *l'anémie des mineurs*, et qui est due à la présence dans les intestins de vers minuscules de 7 à 13 millimètres de long appelés *ankylostomes*.

(Voir la *Revue scientifique* des 5 et 19 mai, et du 2 juin 1888.)

L'épidémie a commencé à la fin de 1878 au chantier d'Airolo, et en décembre 1879 à Goeschenen. Avant cette époque, l'anémie était très rare à Goeschenen où l'on en comptait à peine quatre à cinq cas par an, et encore étaient-ils très simples.

Cette maladie a surtout sévi pendant les cinq mois qui ont précédé le percement du tunnel le 29 février 1880.

L'influence nuisible de la chaleur et de l'humidité s'est particulièrement fait sentir, suivant M. Stockalper, sur les 5 kilomètres de la partie centrale du tunnel. Les ouvriers ne travaillaient plus que deux jours sur trois et cinq heures par jour au lieu de sept, ce qui augmentait ainsi de 25 % les dépenses en main-d'œuvre.

Le recrutement des ouvriers devint difficile, car ils abandonnaient généralement les chantiers après deux mois de travail.

Les chevaux souffraient également des mauvaises conditions dans lesquelles ils travaillaient, et dans les derniers mois qui précédèrent le percement, on perdait en moyenne 10 chevaux par mois (sur 40 ?) dans chacun des chantiers Nord et Sud. Ils tombaient foudroyés par des congestions pulmonaires.

On doit conclure de ce qui précède que l'influence délétère de la température dont on a tant parlé, a été considérablement exagérée et n'a pas été la cause de l'épidémie qui a régné au Saint-Gothard. La véritable cause de cette épidémie doit être recherchée dans la mauvaise hygiène et dans la mauvaise orga-

nisation des chantiers qui faisait vivre les ouvriers au milieu d'un air vicié, bien plus pernicieux pour eux qu'une température de 30° ou même de 34° (1).

La température de 34° qu'on a constatée pour l'air dans les chantiers du Saint-Gothard, a évidemment été tout à fait accidentelle, car voici les renseignements que M. Stapff a donnés sur cette question intéressante :

Le 29 février 1880, immédiatement avant le percement, on avait 32°,1 c. pour température de l'air à l'avancement, mais cette température était exceptionnelle et due à la présence de beaucoup de lampes et de personnes, car en moyenne en janvier elle n'a été à l'avancement que de 30°,6.

En général, la différence entre la température de la roche et celle de l'air ne dépassait pas 1°,50 c.

(1) *Le rapport des experts sur le percement du Simplon*, daté du 17 novembre 1886, contient ce qui suit (page 28) au sujet de cette question importante :

« La commission est donc d'avis qu'on peut admettre que l'on rencontrera pour le tunnel de 16 kilomètres, des températures supérieures à celles du Saint-Gothard sur 4 kilomètres et que cette température pourra bien atteindre sur 2 kilomètres, 38° à 40°; malgré cela, après un examen approfondi, elle croit possible la construction d'un tunnel dans ces conditions.

» Tout d'abord elle rejette complètement l'exemple du Saint-Gothard, où les difficultés rencontrées du fait de la température n'ont été grandes, que parce qu'aucune des précautions et dispositions nécessaires pour se mettre dans des conditions favorables de travail n'avait été prise. Les installations aux deux extrémités du tunnel pour la santé et le bien-être des ouvriers et pour les soins aux malades étaient à peu près nulles ; rien n'avait été prévu dans l'intérieur pour l'alimentation du personnel et l'éloignement des déjections ; les ouvriers buvaient de l'eau contaminée, crevaient pour respirer, la conduite de ventilation sur son parcours, et si, d'après les rapports officiels, l'air arrivait en quantité suffisante pour la respiration, il n'arrivait pas dans les parties chaudes en quantité assez notable pour abaisser sensiblement la température. »

La température à l'avancement variait de 25°,6 à 27°,8 pendant le forage et de 29°,5 à 32°,2 pendant le déblaiement, la température à l'extérieur étant d'ailleurs de 2°,4.

En donnant le plus d'air possible on pouvait faire baisser la température de l'air de 3°,9 à 6°,3 au-dessous de celle de la roche environnante.

Depuis que le tunnel est ouvert, la température de la roche au fond d'un trou de mine et à 7,300 mètres de la tête nord est descendue à 22° c. (octobre 1886). La température de l'air dans cette région varie dans le courant de l'année de 14° à 23°. Quant à l'aérage, il a lieu d'une manière satisfaisante, sans l'emploi d'aucun moyen artificiel, car il y a environ 230 jours par an où le courant d'air est prononcé et 135 jours où il est alternatif.

Les changements de courant sont très brusques. Le mois le plus variable est le mois d'août. Sur les 230 jours de courant régulier, il y en a 145 venant du nord, et 80 venant du sud. La tête sud du tunnel est d'ailleurs à 36 mètres plus haut que celle du nord. Les chiffres qu'on vient de donner varient naturellement d'une année à l'autre, mais ils font suffisamment connaître comment a lieu l'aérage du grand souterrain.

Le personnel n'est pas incommodé par la fumée des locomotives.

Terrains éboulueux. — Enfin la troisième difficulté s'est produite dans la vallée d'Andermatt (Urseren) à 2,800 mètres de la tête nord, où une *faille avec rejet* remplie d'argile (gneiss décomposé) a éprouvé des gon-

flements qui ont obligé à reconstruire les maçonneries pour en augmenter l'épaisseur et la résistance (1).

La faille argileuse proprement dite est comprise entre les kilomètres 2ᵏ784 et 2ᵏ856, soit 72 mètres de long, auxquels il faut ajouter les 18 mètres de *schiste noir décomposé* situé au contact du cipolin entre les kilomètres 2ᵏ766 et 2ᵏ784. Cela fait en tout 90 mètres de *mauvais terrain*, mais il n'y a que 72 mètres (du kilomètre 2ᵏ766 à 2ᵏ838), qui aient donné lieu à des réfections de maçonnerie. Les 18 mètres de schiste noir ont donc fait partie des réfections tandis que les 18 mètres de terrain argileux, situés à l'extrémité sud de la faille, y sont restés étrangers.

Cette région du tunnel a fait grand bruit et donné lieu à beaucoup d'assertions erronées; il me paraît donc utile et même nécessaire de résumer aussi exactement que possible les divers incidents auxquels elle a donné lieu. Les documents que j'ai consultés

(1) Deux autres *mauvaises parties* ont encore été rencontrées dans le tunnel. Elles sont toutes deux accompagnées de *failles* comme celle du kilomètre 2ᵏ800 et présentent des couches écrasées alternant avec des couches décomposées et transformées en argile, mais elles n'ont pas donné lieu comme à Urseren à des difficultés notables.

L'une de ces parties se trouve au milieu du tunnel entre les kilomètres 7ᵏ474 et 7ᵏ537, sur 63 mètres de long. Elle est sèche et n'a pas présenté de poussées exceptionnelles. La voûte a été construite avant les pieds-droits et avec des épaisseurs à la clef variant de 0ᵐ70 à 1 mètre. Elle est faite en pierres de taille de granit avec mortier de ciment de Portland; il s'est produit néanmoins un abaissement de la clef et un rapprochement des naissances de la voûte. On a fait un radier sur 17 mètres de long du kilomètre 7ᵏ502 à 7ᵏ519. Les travaux de ce tronçon ont été exécutés en régie, parce que l'entrepreneur avait refusé d'en prendre la responsabilité.

L'autre partie ébouleuse a été rencontrée entre les kilomètres 10ᵏ269 et 10ᵏ449 et a 180 mètres de long. Elle était humide.

[illegible] les rapports trimestriels du Conseil [illegible] du tribunal arbitral dans le [illegible] contre L. Favre, jugement [illegible]; 3° diverses publications de [illegible] en chef de la Compagnie.

[illegible] — Au printemps de cette année, M. Hell[illegible], remplaça M. Gerwig comme [illegible] de la Compagnie.

[illegible] Compagnie prescrit les types [illegible] à appliquer dans l'exécution des ma[illegible].

[illegible] — [illegible] *moyenne partie* a été traversée par [illegible] dans le courant des mois de [illegible] janvier 1876 pendant lesquels l'a[illegible] a été de 71 m. 50. On a dû remplacer [illegible] par le travail à la main. Ce [illegible] présenté de difficultés, mais il a [illegible] à mesure de l'avancement.

Durant ces mois, on ne pratiqua aucun battage [illegible] se produisit fréquemment dans la [illegible] affaissements et rétrécissements qui obli[illegible] renouveler le boisage.

[illegible] écroulement paraissait imminent et [illegible] prendre eurent pour effet de [illegible] la galerie d'avancement.

[illegible] construite pendant le premier [illegible] terminée en juin 1877, soit [illegible] le percement de la galerie. Com[illegible] terrain a-t-on pu faire la voûte [illegible] un radier et les pieds-droits ?

C'était agir contrairement à toutes les règles de l'art et s'exposer volontairement aux plus graves accidents.

La voûte avait 1 mètre d'épaisseur comprenant en parement des moellons d'appareil ayant alternativement 0m30 et 0m50 de queue et pour le reste une maçonnerie de remplissage faite avec des moellons irréguliers et du mortier hydraulique ordinaire. Cette dernière maçonnerie était contraire aux règles de l'art relatives à la construction des voûtes et n'offrait aucune résistance, de sorte que le moellon du parement supportait seul toute la pression du terrain.

1878.— Au commencement de 1878, après que la cunette du strosse eut été déblayée et pendant qu'on exécutait le radier et les pieds-droits, les avaries de la voûte prirent un caractère si alarmant que sa reconstruction devint inévitable ; elle s'affaissa en effet de 0m70 à la clef, et ses naissances se rapprochèrent de 1 mètre. Ces accidents se produisirent entre les kilomètres 2k785 et 2k811, soit sur 26 mètres de long. A cette occasion (25 mai) on procéda pour la première fois à un relevé contradictoire de l'état de la voûte et de la maçonnerie en général, et on constata que la clef de voûte s'était abaissée jusqu'à un mètre et que les naissances s'étaient rapprochées de plus de un mètre.

Un tribunal arbitral fut nommé pour décider à qui incombait la responsabilité des avaries et des réfections à faire. Ce tribunal décida (26 juin 1878) que la Compagnie devait payer à l'entrepreneur la moitié de la maçonnerie à démolir.

Le 21 octobre, la Compagnie prescrivit de refaire

la maçonnerie avec les mêmes dimensions que précédemment, soit un mètre d'épaisseur pour la voûte et 1m50 pour les pieds-droits, mais avec la condition de n'employer que des moellons plats et lités et arasés par assises et de fabriquer le mortier avec de la chaux de Virieu à prise rapide.

Le 3 décembre la Compagnie accorda à l'entrepreneur pour ces travaux de réfection une augmentation de prix de 12 fr. par mètre cube pour la voûte et de 10 fr. pour les pieds-droits.

On n'a pas fait de reconstruction de voûte dans le courant de cette année (1878).

M. l'ingénieur Hellwag quitta la Compagnie à la fin de décembre et fut remplacé provisoirement par son adjoint, M. Gehrlich.

1879.— De janvier à mars on refit dans les conditions qu'on vient d'indiquer deux anneaux, l'un de six mètres entre les kilomètres 2k783 et 2k789 et l'autre de cinq mètres entre les kilomètres 2k805 et 2k810. Ces anneaux se brisèrent aussitôt après leur clavage.

La Compagnie prescrivit alors une épaisseur de 1m50 à la clef avec une augmentation modérée en se rapprochant des pieds-droits.

On commença avec ces dimensions la réfection de deux anneaux, l'un de 5m50 (2k799 à 2k804), l'autre de 7 mètres (2k810 à 2k817). Ces anneaux se brisèrent également avant d'être achevés.

En présence de ce nouvel échec la Compagnie prescrivit une épaisseur de 2m60 pour les pieds-droits en conservant 1m50 à la voûte, et l'on construisit en juillet avec ces dimensions un anneau (*dit grand anneau*) de

huit mètres de long (2ᵏ789 à 2ᵏ797). Cet anneau résista aux poussées du terrain et n'éprouva que de faibles avaries constatées seulement et réparées au mois d'août 1880.

Le 31 juillet, M. Bridel fut nommé ingénieur en chef de la Compagnie.

On voit que dans le premier semestre de 1879 on a reconstruit 31 mètres courant de voûte dont 8 mètres seulement avec succès; ces 31 mètres comprenaient toute la région de 26 mètres citée plus haut et qu'on avait d'abord cru être seule en mauvais état; mais dans le courant de l'année 1879 on constata que les maçonneries s'étaient également détériorées au nord sur 17 mètres de long (2ᵏ766 à 2ᵏ783) comprenant les *schistes noirs décomposés* et sur 24 mètres au sud (2ᵏ814 à 2ᵏ838); on fut ainsi obligé de reconstruire 72 mètres courant de revêtement à savoir: 23 mètres déjà reconstruits une fois et 49 mètres non encore reconstruits. Cette situation provoqua entre l'entrepreneur et la Compagnie un nouveau conflit, qui obligea le département fédéral des chemins de fer à inviter (16 juillet 1879) la Compagnie à prendre sans retard toutes les mesures nécessaires pour prévenir des catastrophes sans avoir égard aux contestations pendantes avec l'entrepreneur au sujet des frais de reconstruction.

La Compagnie se mit immédiatement à l'œuvre et prit alors le parti de refaire toutes les maçonneries en commençant par les deux extrémités de la partie mauvaise et en leur donnant les épaisseurs suivantes, savoir : 1ᵐ20 à 1ᵐ50 à la clef et 1ᵐ80 à 2ᵐ50 aux naissances de la voûte. Les pieds-droits sont même jus-

qu'à 3 mètres d'épaisseur. Le rapport trimestriel du 30 juin 1880 dit que les nouveaux anneaux sont en pierre de taille.

En 1879, de août à décembre, on refit les maçonneries sur 25 mètres de long; en 1880, on en refit 33 mètres, et en 1881 on en a refait encore 14 mètres. Total : 72 mètres (1).

Le dernier anneau a été fini en août 1881.

M. le professeur D. Colladon, de Genève, a publié en 1880 deux brochures dans lesquelles on lit ce qui suit au sujet de ces travaux :

« Sous la plaine d'Andermatt, le tunnel traverse » des terrains de schistes alumineux mélangés de » gypse et en décomposition, qui aspirent *l'humidité* » *de l'air*, s'effritent et se gonflent en exerçant des » poussées énormes sur les maçonneries (2); les revê- » tements en granit, voûtes et pieds-droits, calculés par » l'ingénieur en chef de la Compagnie, ont été écra-

(1) Sur ces 72 mètres il n'y en a que 23 qui ont été refaits deux fois, savoir : les quatre anneaux (2^k,783-2^k,789) — (2^k,799-2^k,804) — (2^k,805-2^k,810) et (2^k,810-2^k,817).

(2) Dans une lettre écrite au journal *Eisenbahn*, M. Stockalper explique comme suit ce qui s'est passé dans cette région. — Le caractère dominant du terrain que traverse la *mauvaise partie*, n'est pas celui d'un terrain qui gonfle sous l'influence de l'atmosphère, mais il est plastique dans toute sa masse et exerce une pression lente, excessive et constante dont les effets ne sont nullement augmentes par l'influence atmosphérique.

Ces observations de M. Stockalper doivent être exactes, car elles sont conformes à celles qu'on fait journellement dans tous les travaux en terrains argileux. Il n'y a donc rien eu là d'extraordinaire, comme on pourrait le croire en lisant ce qu'a écrit à ce sujet M. le professeur Colladon. (Voir le *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils de Paris*, année 1880.)

» sés deux fois (1); on refait un troisième revêtement » dont la voûte aura 1m50 dépaisseur et les pieds-» droits 3 mètres.

» Le tunnel du Saint-Gothard est entièrement percé » depuis trois mois et il aurait pu être achevé dès la » fin de cette année si ce tunnel ne traversait, sous » la vallée d'Andermatt, *deux cents mètres de terrain* » *schisto-argileux calcaire mélangé de gypse* (2).

» *Là, depuis quatre ans*, dans les parties centrales » de ces deux cents mètres, tous les efforts pour » résister aux pressions, très lentes, mais presque » irrésistibles de ces terrains sont restés inutiles. *On* » *a dû étayer et reconstruire deux fois* (3) *les pieds-* » *droits et la voûte, tripler leur épaisseur* et, à » l'heure présente, les ingénieurs de la Compagnie et » ceux de l'entreprise du tunnel (qui n'est pas respon-» sable et exécute les ordres de l'ingénieur en chef » de la Compagnie) ne savent pas si, avec cette » triple épaisseur, les maçonneries résisteront.

» *Ces parties centrales auront coûté plus de* » *20,000 francs par mètre courant.* »

Comme on le voit, on a fait grand bruit des difficultés causées par quelques couches d'argile, peu importantes d'ailleurs en proportion de la longueur totale du tunnel, puisqu'elles n'en occupent pas la

(1) La voûte n'a été écrasée *deux fois* que sur 23 mètres de long, compris entre les kilomètres 2k,783 et 2k,817.

(2) Il n'y a que 72 mètres de long qui aient présenté quelques difficultés de construction.

(3) Il n'y a eu que 23 mètres de voûte qui aient été reconstruits *deux* fois. Les autres anneaux, comprenant 49 mètres de long, n'ont été reconstruits qu'une seule fois.

de M. Colladon sont
par les rapports du Conseil
de MM. les ingénieurs
remarquer que
au reste dans tous les
auraient été considé-
maçonné le tunnel
ment, au lieu de traîner
on avait commencé les
tunnel. Il est facile, en
temps, le terrain une
proche en proche, et
une grande hauteur, de
boisages et les maçon-
à celle d'un remblai
terrain en se désa-
perméable aux eaux qui
beaucoup le mal.

qu'on a rencontrées au
être facilement évitées,
suivantes :

après le percement de
maçonneries;
la voûte qui reposait
au lieu de commencer
droits ;
celle du parement
non liés, et le mor-
rapidement;
par anneaux isolés les
commencer par les extré-

mités de la partie mauvaise comme on l'a fait plus tard;

5° L'épaisseur de 1 mètre donnée aux maçonneries aurait probablement été suffisante, si on n'avait pas commis les fautes qu'on vient d'énumérer et si on avait eu soin de donner aux pieds-droits une courbure ayant le même rayon que la voûte.

Procès du Saint-Gothard contre L. Favre. — Dans le procès qui a eu lieu entre la Compagnie du Saint-Gothard et L. Favre, le tribunal arbitral a jugé que la Compagnie ne devait payer à l'entrepreneur que les trois quarts du prix des constructions écroulées, mais devait lui payer la totalité des dernières constructions exécutées.

On a reproché à l'entrepreneur des lenteurs d'exécution, des mal-façons, une mauvaise organisation, des boisages insuffisants et mal entretenus, un écoulement des eaux mal assuré, etc. — On a reproché à la Compagnie les types insuffisants qu'elle a prescrits pour les maçonneries.

L'entrepreneur a réclamé pour la mauvaise section de 72 kilomètres une somme de 1,508,131 fr., non compris les frais généraux, et il lui a été alloué en tout 1,021,857 fr., soit 14,200 fr. par mètre courant.

Le tribunal ayant admis que la Compagnie était responsable dans la proportion des trois quarts pour les accidents survenus au kilomètre 2ᵏ800, a fait droit dans la même proportion aux réclamations suivantes de l'entrepreneur :

1° L'encombrement au kilomètre 2ᵏ800 a obligé d'interrompre les transports par locomotives, pendant

[illegible] à mai 1881), et d'employer des [illegible]

[illegible] de dépenses pour ces transports a [illegible] experts de 160,000 fr., soit environ [illegible] mètre cube de déblais transportés. L'en- [illegible] demandé 260,000 fr. Le tribunal lui [illegible] 200,000 fr.

[illegible] rapports du Conseil fédéral, il paraît [illegible] eu une interruption dans le service [illegible] pendant les mois de juillet à octo- [illegible]

[illegible] du kilom. 2ᵏ800 ont eu pour effet de [illegible] des travaux situés plus au sud, [illegible] une dépense exceptionnelle évaluée par [illegible] à 270,000 fr. Le tribunal lui a alloué [illegible] de cette somme, soit 202,500 fr.;

[illegible] même cause, il a fallu augmenter le prix [illegible] travaillant dans de mauvaises conditions [illegible] une augmentation de dépenses de [illegible] la Compagnie a encore payé les trois [illegible] 67,500 fr.

[illegible] avait fait encore d'autres réclama- [illegible] écartées, telles que les suivantes : [illegible] force motrice. Louis Favre a dû [illegible] en 1871, à la tête sud, pour pren- [illegible] à 3 kilomètres de distance. La [illegible] à cet effet était exposée aux ava- [illegible] interrompue pendant 153 jours, de [illegible]

[illegible] non prévue, disait l'entre- [illegible] n'est pas exacte, car tous les [illegible] que la température du sol

augmente en général de 1° par 30 mètres de profondeur, tandis que dans les tunnels des Alpes elle ne paraît augmenter que de 1° par 50 mètres. On a donc trouvé dans ces tunnels des chaleurs bien inférieures à celles auxquelles on devait s'attendre. Les juges ont considéré que les inconvénients résultant d'une température élevée faisaient partie des risques que l'entrepreneur avait pris à sa charge.

6° Crise financière de la Compagnie qui aurait porté préjudice au crédit de l'entreprise. Les juges ont fait observer que l'entrepreneur n'avait pas souffert de cette crise puisqu'il avait toujours été payé régulièrement.

7° Hostilité prétendue de l'ingénieur en chef de la Compagnie envers l'entrepreneur. Cette réclamation a été repoussée par le tribunal.

8° Retard dans la fixation des types de maçonnerie notamment entre les kilomètres 4ᵏ800 à 6ᵏ100 au nord et 4ᵏ300 à 5ᵏ900 au sud. La Compagnie avait d'abord prescrit des anneaux isolés, puis elle a demandé un revêtement complet, ce qui a obligé l'entrepreneur à des déplacements de matériel et fausses manœuvres que les juges ont estimés à 100 fr. par mètre courant, soit pour 2,300 mètres qui étaient en cause à une somme de 230,000 fr.

Organisation vicieuse des chantiers. — On vient d'énumérer les difficultés *naturelles* rencontrées dans les travaux du Saint-Gothard. Ces difficultés ont sans doute leur importance, mais au point de vue du prix de revient des travaux elles ont été très secondaires en comparaison de celles que l'entreprise s'est

[illegible] par une mauvaise organisation [illegible]

[illegible] Favre a commis une grande faute en [illegible] de direction au sommet du tunnel [illegible] à sa base. Elle a sans doute agi [illegible] sans bien se rendre compte des diffi- [illegible] conséquence de ce mode d'attaque. [illegible] ingénieur de la Compagnie, s'est efforcé [illegible] la galerie d'avancement à la base ; il [illegible] commencer ainsi par la Compagnie, [illegible] ingénieur, dans la tranchée qui pré- [illegible] mais l'entêtement et l'ignorance de [illegible] malheureusement triomphé de la raison [illegible]. La ruine de l'entrepreneur en a été [illegible] inévitable.

[illegible] dans l'introduction de sa brochure [illegible] les faits suivants, qui me paraissent [illegible] :

[illegible] à la fin de 1874, soit environ deux ans après [illegible] des travaux, un spécialiste dis- [illegible] M. le professeur Rzihà, soumit cette mé- [illegible] de L. Favre), à une critique très détaillée [illegible]. Il affirma, entre autre, que l'achève- [illegible] du tunnel serait sinon rendu impossible, du [illegible] considérablement retardé, si les eaux que [illegible] rencontrerait probablement sous la vallée d'An- [illegible] étaient abondantes ; il affirma, en outre, [illegible] le procédé adopté, l'achèvement du tunnel [illegible] avoir lieu que longtemps après la ren- [illegible] des galeries. »

[illegible] s'ensuivit une polémique des plus vives [illegible] les ingénieurs versés dans la spécialité des

» tunnels, mais naturellement les conversions furent » peu nombreuses. Quand les partisans de la galerie » de base faisaient valoir le grand retard de l'achè- » vement sur l'avancement de la galerie au Gothard » comparé à ce qui avait eu lieu au Mont-Cenis, ceux » de la galerie en calotte attribuaient ce retard à » diverses causes, mais surtout à la rapidité avec » laquelle se perçait la galerie au Gothard. »

La question la plus importante dans les grands tunnels est celle de la vitesse à laquelle on sacrifie tout et qui, dans certaines limites, est la principale cause du prix élevé de ces ouvrages. Or la solution de cette question exige impérieusement que la galerie d'attaque soit placée à la base du tunnel, et il n'était pas nécessaire de faire l'expérience désastreuse du Saint-Gothard pour démontrer cette vérité, car elle a été évidente de tout temps, et j'en ai fait moi-même l'application en 1858 au Jura Neuchâtelois pour la construction du tunnel du Gibet, long de 664 mètres et situé à 2 kilomètres environ de la ville de Neuchâtel. Ce tunnel devant être construit à bref délai, j'avais stipulé dans le marché avec l'entrepreneur que, contrairement à ce qui se pratiquait dans les autres tunnels de la ligne, la galerie d'avancement serait percée ici à la base de l'ouvrage. Indépendamment de cette galerie de base, on en perça encore une petite à la calotte, ainsi qu'on vient de le faire à l'Arlberg. Ce tunnel, commencé le 1er novembre 1858, fut percé le 8 juillet suivant, soit après huit mois de travail, et le 13 août, *soit cinq semaines plus tard*, il fut complètement terminé. Malgré la rapidité de l'exécution et l'ouverture de quatre

puits ayant ensemble 100 mètres de profondeur, ce tunnel n'a coûté tout compris que 590 fr. le mètre courant, ce qui prouve que la méthode suivie ne peut être considérée comme onéreuse, même pour un tunnel à une voie (1).

Antérieurement au Saint-Gothard, le tunnel du Mont-Cenis avait été percé avec une galerie de base et on s'en était bien trouvé. Pourquoi donc l'entreprise Favre n'a-t-elle pas suivi cet exemple?

Il serait superflu d'ouvrir ici une discussion sur les avantages et les inconvénients des deux méthodes qui sont en présence, je me contenterai, pour faire apprécier les inconvénients de la méthode suivie au Saint-Gothard, de relater un certain nombre de faits énumérés par M. Bridel dans sa lettre de mai 1881 (2), savoir:

1° Le système d'attaque du Saint-Gothard cause des *faux frais effrayants* par les déplacements de voie, les épuisements, le manque de garages sur la longueur exagérée des chantiers, etc., etc. — M. Bridel dit que les frais généraux de l'entreprise sont de 186,000 francs par mois et s'accumulent par le retard des travaux.— Il dit aussi (voir sa brochure de 1882), que dans la partie sud du tunnel, et pendant les quatre années de 1877 à 1880, la proportion des hommes employés à l'entretien des voies et des conduites et aux épuisements a été égale au 10,3 % de tous les autres ouvriers occupés dans le tunnel et que ces dépenses

(1) Ce tunnel traverse le calcaire néocomien sur 490 mètres, les marnes néocomiennes sur 120 mètres et des sables sur 55 mètres. Il est voûté sur 305 mètres et a donné une quantité d'eau assez importante qui sortait du rocher dans le voisinage des marnes.

(2) Voir *Revue générale des Chemins de fer*, juin 1881.

auraient presque entièrement disparu si la galerie d'avancement avait été placée à la base du tunnel.

2° Les ouvriers sont répartis sur 5,000 mètres de long tandis qu'à l'Arlberg les chantiers ont été concentrés sur 500 mètres en arrière du front de taille, ce qui a considérablement simplifié le service et a de plus amélioré l'aérage qui au Saint-Gothard a été des plus défectueux.

3° Il faut changer sans cesse les dispositions des travaux au lieu de les perfectionner comme dans un travail bien coordonné.

4° On est obligé d'attaquer le strosse comme une fouille de fondation.

5° Il faut continuellement déplacer les voies.

6° On a des rampes coûteuses à gravir et à déplacer à chaque kilomètre ; ce qui cause des frais et une perturbation dans le service des transports.

7° Il y a des conflits continuels entre le service des transports et les ouvriers mineurs échelonnés sur 5,000 mètres de long.

8° Il faut par moment 300 maçons et souvent il est difficile d'en employer 40.

9° Après le percement de la galerie de direction, il a fallu 22 mois au Saint-Gothard pour terminer les travaux, tandis qu'il n'en a fallu que 9 au Mont-Cenis, 6 1/2 à l'Arlberg et 5 semaines au Jura Neuchâtelois en 1858.

10° Au Mont-Cenis la ventilation était parfaite sur toute la longueur achevée du tunnel, tandis qu'au Saint-Gothard, on rencontrait partout de l'air vicié.

11° Ajoutons à ces faits les encombrements et faux frais qui sont résultés de ce qu'au lieu de maçonner

immédiatement la mauvaise partie du kilomètre 2ᵏ800, on a traîné ces travaux en longueur pendant près de six ans (de janvier 1876, date du percement de la galerie de direction, jusqu'au mois d'août 1881, date d'achèvement du dernier anneau de maçonnerie). Il est résulté de là une dépense supplémentaire de plus de un million uniquement pour la réfection des maçonneries.

12° Ajoutons enfin les maladies, retards et faux frais dus au mauvais aérage qui a été lui-même aggravé par la dissémination des chantiers.

13° Il y a encore une faute grave que l'entreprise a commise et qu'on doit signaler, c'est celle qui a eu pour effet de supprimer le puits dont la Compagnie avait judicieusement prévu l'ouverture dans la vallée d'Andermatt. Voici, en effet, ce que portait l'annonce pour le concours des travaux à la date du 5 avril 1872 :

« La perforation de la moitié sud du tunnel devra » s'opérer entièrement depuis l'embouchure du tun- » nel, près Airolo. Par contre, il pourra être utile de » percer sur la partie nord, à 3,550 mètres de l'em- » bouchure du côté de Goeschenen, un puits de 300 » mètres de profondeur. »

Ce puits aurait eu une grande utilité pour l'aérage des chantiers qui a été si défectueux. Il aurait aidé au percement du tunnel et à l'enlèvement des matériaux dont le transport a été gêné par les travaux de la *mauvaise partie* du kilomètre 2ᵏ800. Il faciliterait encore aujourd'hui l'aérage du tunnel. Enfin, il aurait pu être d'un grand secours si un éboulement sérieux s'était produit au kilom. 2ᵏ800 et avait ainsi obstrué le tunnel en y ensevelissant un grand nombre d'ou-

vriers, comme cela a eu lieu lors de la construction du Hauenstein, par l'effondrement d'un puits.

Dans une brochure datée de 1880, page 14, M. le professeur Colladon *déclare que ni lui, ni M. Favre n'ont pensé un seul moment à entreprendre ce puits, par la conviction des difficultés qui résulteraient des infiltrations et du peu de consistance des terrains traversés.*

Cette observation aurait pu être juste si on avait placé le puits au kilom. 2ᵏ800; mais la Compagnie avait eu soin de le placer au kilom. 3ᵏ550, c'est-à-dire en un point où le terrain est excellent et composé de *schiste à séricite* et où, par conséquent, le creusement d'un puits n'aurait présenté aucune difficulté. On voit donc encore ici avec quelle légèreté et quelle imprévoyance on a organisé les travaux.

Si on consulte les rapports du Conseil fédéral, correspondants à l'époque où la galerie de direction a traversé ces schistes, soit de juin à septembre 1876, on y trouve l'indication que ce terrain était *exceptionnellement favorable et sec;* mais, en échange, on est surpris d'apprendre que les travaux marchaient lentement, pour trois causes, savoir : la rupture des conduites d'air, l'arrêt des transports de matériaux par l'enlèvement des étais, et enfin un long arrêt provoqué par l'imminence d'un éboulement au kilom. 2ᵏ800.

14° Le fait suivant permet encore d'apprécier l'entêtement de L. Favre. La Compagnie, pour encourager cet entrepreneur à organiser convenablement ses chantiers, avait décidé de lui payer 1,300 francs

par mètre courant de galerie de direction exécuté chaque mois, mais à la condition qu'il conserverait une distance minimum de 600 mètres entre le front de taille et le tunnel complètement achevé. — L. Favre n'ayant pas rempli cette condition, la Compagnie finit par se décider au bout de trois ans, soit en décembre 1875, à réduire le prix excessif de 1,300 fr. au chiffre plus normal de 800 fr. (*Voir le rapport fédéral du 31 décembre 1875.*) On a vu que, loin de réduire à 600 mètres la longueur des chantiers, l'entrepreneur les avait, au contraire, étendus sur 5,000 mètres de long.

M. Bridel, dans sa brochure de 1882, relate à ce sujet que M. Favre s'était engagé, par procès-verbal du 19 juin 1871 et par traité du 21/25 septembre 1875, à une marche bien plus rapide des travaux et à une grande réduction de l'étendue des chantiers.

Maçonnerie. — L'annonce faite par la Compagnie du Saint-Gothard à la date du 5 avril 1872 pour inviter les entrepreneurs à présenter des soumissions portait ce qui suit : « *On peut admettre qu'un revê-* » *tement complet même au radier sera rarement* » *nécessaire. Là, toutefois, où ce revêtement devra* » *avoir lieu, on adoptera la section d'ouverture du* » *Mont-Cenis de 8 mètres de largeur maximum,* » *sur 6 mètres de hauteur sous clef jusqu'au* » *niveau de la voie. Là où il n'y aura que simple* » *revêtement du ciel de la galerie, la voûte sera en* » *général en arc surbaissé. Il pourra se présenter* » *par-ci par-là des murs de revêtement en maçon-* » *nerie brute. Probablement que sur des étendues* » *assez longues du tunnel tout revêtement sera su-*

» *perflu. Dans ces parties le tunnel pourra être* » *en arc surhaussé.* »

Dans sa soumission, s'élevant à 47,804,300 fr., M. L. Favre prévoyait un revêtement sur environ moitié de la longueur du tunnel et un cube de maçonnerie de 70,000 mètres évalués par lui (y compris les niches) à 5,419,800 fr.

En 1875, lorsque M. Hellwag prit la direction des travaux comme ingénieur en chef de la Compagnie, il déclara aussitôt qu'il fallait revêtir tout le tunnel. On a essayé de faire des voûtes surbaissées sans pieds-droits, mais la roche ne se prêtait pas, dit-on, à être taillée convenablement pour soutenir les extrémités de ces voûtes. Après beaucoup de discussions et d'indécision la Compagnie (M. Bridel étant ingénieur en chef) donna enfin l'ordre, le 25 octobre 1880, de revêtir tout le tunnel (1).

Voici le détail des revêtements qui ont été exécutés :

Voûte ayant 0^m40 d'épaisseur à la clef, longueur 11,842 mètres ;

Voûte ayant 0^m50 à 0^m70 d'épaisseur à la clef, longueur 2,484 mètres ;

Voûte ayant 0^m70 à 1 mètre d'épaisseur à la clef, longueur 551 mètres ;

Voûte ayant 1 à 1^m50 d'épaisseur à la clef, longueur 107 mètres.

(1) Il paraît que cet ordre s'appliquait essentiellement à une longueur de tunnel de 484 mètres, laissée jusque-là sans revêtement, et fut provoqué par une décision en date du 2 octobre 1880, de l'ingénieur chargé par le Conseil fédéral de la surveillance des travaux.

Le cube moyen de maçonnerie exécuté est de 8 mètres par mètre courant de tunnel, soit en tout 120,000 mètres cubes, au lieu de 70,000 mètres qu'avait prévus M. L. Favre dans sa soumission des travaux.

Radier.— On n'a exécuté de radiers que sur deux points seulement, savoir entre les kilomètres 2ᵏ770 et 2ᵏ832, soit sur 62 mètres de longueur, et entre les kilomètres 7ᵏ502 et 7ᵏ519, soit sur 17 mètres de longueur; total 79 mètres de radier.

Aqueduc.— Dans la région nord l'aqueduc a généralement 0ᵐ40 à 0ᵐ60 d'ouverture. Dans la région sud il a jusqu'à 0ᵐ90 d'ouverture. Il est placé sur l'un des côtés du tunnel, sauf dans les mauvaises parties où il est placé au milieu de la plate-forme, ainsi que près des têtes sur environ 700 mètres de long.

La **galerie d'avancement** avait 2ᵐ50 sur 2ᵐ50 et a été placée au sommet du tunnel. On a constaté, à la rencontre des deux galeries, une erreur de 0ᵐ33 en plan et de 0ᵐ05 en hauteur.

L'**avancement moyen**, par journée de 24 heures, et pour toute la durée des travaux, a été de 2ᵐ882 du côté de Gœschenen et de 2ᵐ592 du côté d'Airolo. Le maximum annuel a eu lieu en 1878, où l'on a fait moyennement 3ᵐ586 par jour à Gœschenen, et 3ᵐ369 à Airolo. L'avancement maximum d'un jour a été de 7ᵐ30 en octobre 1878 au côté nord et 7ᵐ06 en août 1878 au côté sud.

M. Stockalper, ancien ingénieur de l'entreprise L. Favre, a donné, dans la *Revue générale des Chemins de fer*, de mars 1882, les renseignements sui-

vants sur l'avancement moyen de la galerie de direction dans les divers terrains du Saint-Gothard : Roche amphibolique, 2 mètres à 2m70. — Serpentine, 2m53. — Granit, 2m95. — Gneiss quartzeux ou noueux, 3 mètres — Gneiss et schiste, 3m30 à 5m50, moyenne, 4 mètres. — Cipolin, 1m20. — Gneiss décomposé, travail à la main, 1m20.

Le tableau suivant fait connaître l'avancement annuel des deux galeries de direction :

ANNÉES	COTÉ NORD AVANCEMENTS		COTÉ SUD AVANCEMENTS	
	DE L'ANNÉE	Moyens par jour	DE L'ANNÉE	Moyens par jour
	Mètres	Mètres	Mètres	Mètres
1872	18 90	0.281	101 70	0.933
1873	581 30	1.319	491 30	1.346
1874	1.037 10	2.841	747 40	2.048
1875	1.173 50	3.215	1.255 60	3.440
1876	1.005 70	2.755	1.020 60	2.797
1877	1.230 50	3.371	994 »	2.723
1878	1.309 »	3.586	1.229 90	3.369
1879	1.177 »	3.225	1.158 50	3.174
1880	211 70	3.528	165 70	2.762
TOTAUX.	7.738 70		7.134 70	
Moyennes ...	1.050 163	2.882	931 242	2.592

Durée des travaux. — Les travaux commencés en juin 1872 ont été terminés le 31 décembre 1881.— Le percement a eu lieu le 29 février 1880.

FRAIS DE CONSTRUCTION DU TUNNEL DU SAINT-GOTHARD

Les travaux du tunnel du Saint-Gothard furent mis en adjudication le 5 avril 1872. Sept entreprises se présentèrent dont deux seulement parurent sérieuses, savoir, M. Louis Favre et la Société italienne des travaux publics à la tête de laquelle se trouvaient les anciens ingénieurs qui avaient dirigé le percement du Mont-Cenis.

Voici comment était formulée la soumission de l'entreprise L. Favre :

	SOUMISSION L. FAVRE	
	PRIX DU MÈTRE COURANT	VALEUR
Excavation.....	2,800 fr.	41,720,000 fr.
Revêtement.....	364	5,419,800
Ballast, pose de la voie.		
Galerie de direction...	44	664,500
TOTAL...	3,208 fr.	47,804,300 fr.

L. Favre ne prévoyait un revêtement que sur la moitié environ du tunnel et en établissait le prix comme suit :

40,000 mètres cubes de pierre de taille à 75 francs, ci ..... 3,000,000 fr.
60,000 mètres carrés de parement à 20 francs, ci..... 1,200,000

A reporter..... 4,200,000 fr.

Report.....	4,200,000 fr.
30,000 mètres cubes de maçonnerie ordinaire à 40 francs, ci	1,200,000
Niches	19,800
TOTAL.....	5,419,800 fr.

Les conditions essentielles du marché de l'entreprise Louis Favre étaient (Voir Figuier, *Nouvelles Conquêtes de la Science*) :

« 1° M. Favre a déposé aux mains de la Compa-
» gnie du Gothard un cautionnement de 8 millions.

» 2° Il assume l'exécution complète du tunnel, à ses
» périls et risques, ainsi que de toutes les installa-
» tions qu'il jugera nécessaires pour l'achèvement du
» tunnel, comprenant la force motrice, les compres-
» seurs, les perforateurs et autres machines, les cin-
» tres et échafaudages, les voies de service, le maté-
» riel de transport, les ateliers, magasins, habitations
» d'ouvriers, hôpitaux, chantiers, pour le prix de 2,800 fr.
» le mètre courant, non compris les maçonneries et
» la voie définitive. Ce prix comprend également la
» construction de l'aqueduc et l'excavation des niches.

» 3° Ces prix comprennent également toutes les chan-
» ces auxquelles est exposé l'entrepreneur, par suite
» de difficultés imprévues qui pourraient se présenter
» dans l'exécution.

» 4° M. Favre s'engage à achever complètement le
» tunnel dans l'espace de huit ans, à dater du
» 1er octobre 1872. Si le tunnel n'est pas achevé au
» bout de huit ans, il subira, pendant le premier se-
» mestre de la neuvième année, une retenue de 5,000

» francs par jour, et pendant le second semestre une » retenue de 10,000 francs par vingt-quatre heures, » jusqu'au jour de l'achèvement (1). »

Quant à la Société italienne, elle avait d'abord demandé 3,825 francs par mètre courant pour l'excavation seule, mais avait finalement réduit ce prix à 3,350 francs. Pour les maçonneries elle avait demandé des prix qui étaient près du double de ceux de L. Favre.

Prix des maçonneries. — Les maçonneries étaient payées suivant les prix qui figurent à la soumission relatée ci-dessus et qui font revenir le *prix moyen* du mètre cube à 77 fr. 40 pour un cube total prévu par l'entrepreneur de 70,000 mètres, soit 4m66 par mètre courant du tunnel entier. — En exécution, on a fait 120,000 mètres cubes de maçonnerie, soit 8 mètres cubes par mètre courant, ou près du double des prévisions de L. Favre. Le prix de 77 fr. 40 pourrait paraître exagéré, si l'on ne savait qu'il comprend l'excavation de la roche que la maçonnerie doit remplacer ; excavation qui, évaluée à 17 fr. 40, réduit la maçonnerie au prix normal de 60 francs le mètre cube.

Prix de l'excavation. — L'excavation étant payée 2,800 francs le mètre courant, si l'on divise ce prix par le cube auquel il s'applique, soit les 45 mètres formant le vide du tunnel, on trouve que le mètre cube d'excavation revient à 62 francs. Ce prix est évidemment fort exagéré, car il est plus du triple de celui que donnent les autres tunnels, même à une seule voie, de la ligne du Saint-Gothard. — A l'Arlberg,

(1) Le tunnel devait donc être fini le 1er octobre 1880, mais le 1er octobre 1880 la Compagnie consentit à reporter le délai d'achèvement jusqu'au 1er janvier 1881.

le prix moyen du mètre cube d'excavation n'a été que de 32 fr. 50, soit moitié moindre.

En cours d'exécution, la Compagnie payait à l'entrepreneur des acomptes qui, pour l'excavation, étaient fixés d'après les données du tableau suivant, dont l'ensemble reconstitue le prix de 2,800 francs.

	SURFACE en m. carrés	PRIX du m. cube
Petite Galerie.....	$7^{m}7$	104 fr.
Calotte	9.5	105 »
Cunette de Strosse.....	9.5	47 »
Strosse	18.4	25 »
Tunnel complet.....	45^{m}	62 »

Quant aux acomptes pour maçonneries, on modifia, en 1875 et le 3 août 1877, la série des prix au mètre cube, pour lui substituer des prix au mètre courant parmi lesquels on trouve :

Prix du revêtement de	$0^{m}40$	d'épaisseur....	830	fr.
—	$0^{m}50$	—	945	»
—	$0^{m}60$	—	1090	»

Prix d'exécution du tunnel du Saint-Gothard. — On a vu que, d'après la soumission de L. Favre, le tunnel ne devait coûter que 3,208 francs le mètre courant. M. l'ingénieur Meyer, dans une brochure publiée en 1888, donne, page 26, le prix de revient total du tunnel, lequel serait de 4,429 francs le mètre courant, en y comprenant la voie, les bâtiments et le matériel, et de 4,300 francs sans ces accessoires. Ce dernier prix comprend encore les dépenses sui-

vantes : frais d'administration centrale, 58 francs ; direction technique, 168 francs ; intérêts payés par la Compagnie pendant la construction, 172 francs, soit ensemble 398 francs.

Les dépenses d'administration et de direction technique ont été excessives. Celles pour intérêt des capitaux ne représentent que 4 % environ de la dépense totale ; ce chiffre est anormal et mériterait quelques explications.

Si l'on retranche de 4,300 francs les frais généraux de la Compagnie, soit 398 francs, on trouve que les travaux faits par l'entrepreneur sont revenus à 3,902 francs au lieu de 3,208 francs prévus au début en 1872 par l'entrepreneur lui-même. Il y a donc eu sur les prévisions une augmentation de 700 francs, soit 22 %. Cette différence provient en partie des sommes allouées à l'entrepreneur par le tribunal arbitral pour diverses réclamations contentieuses mais elle provient surtout de l'augmentation du cube de maçonneries (120,000 mètres exécutés au lieu de 70,000 mètres prévus) et de ce fait que les maçonneries n'ayant eu que 0^m40 d'épaisseur sur les 4/5 de la longueur du tunnel coûtaient généralement plus de 120 fr. le mètre cube au lieu du prix moyen de 77 fr.50 résultant des prévisions de l'entrepreneur.

M. Rambert, avocat de L. Favre, a annoncé dans le *Journal de Genève* du 25 août 1885, que son client n'avait reçu que 3,750 francs environ par mètre courant et que ses pertes s'élevaient à 5,869,000 francs.

Suivant M. l'ingénieur Meyer (brochure de 1888, page 26), cette entreprise se serait soldée par une perte de 5,314,214 fr. 45, soit 387 francs par mètre

courant (1). — Les observations faites par M. Bridel sur l'organisation des chantiers et que nous avons résumées page 100 suffisent amplement pour expliquer ce fâcheux résultat.

M. Bridel a calculé qu'avec les prix de l'Arlberg, la partie située entre le troisième et le quatrième kilomètre à partir de la tête n'aurait dû coûter au Saint-Gothard que 2,646 fr. 80 (2) le mètre courant pour le

(1) A titre de renseignement et comme document historique, il paraît utile de donner ici l'extrait suivant de la lettre adressée au *Journal de Genève* du 25 août 1885, par M. l'avocat Rambert:

« Il est faux que dans le chiffre des pertes de l'entreprise figurent pour plus de 4 millions de francs les intérêts, commissions, etc., payés aux associés ou créanciers de celle-ci. L'entreprise du Grand Tunnel a payé en intérêts à la *Compagnie du Gothard* pour les diverses avances de cette dernière, plus de 2,400,000 francs. Elle a payé à ses autres créanciers, pour intérêts, formation de capital de garantie, et pour l'emprunt de 1876, la somme totale de 1,340,000 francs. Pour un travail de dix ans de durée et d'un coût de près de 60 millions, cette somme est absolument insignifiante. Il est vrai que l'entreprise devait payer à ses créanciers une commission annuelle de 3 pour cent, compensation très modérée des risques courus par le capital, mais cette commission n'a plus été payée depuis septembre 1875. Elle figure sur les livres au crédit desdits créanciers, mais elle ne figure *sous aucune forme* sur le bilan de liquidation et n'est pas comprise dans le chiffre de 5,869,000 francs de pertes indiqué plus haut. S'il en était autrement, les pertes se chiffreraient par plus de 7 millions et demi. »

» La supposition que, par des conventions secrètes, on ait mis à l'abri la fortune personnelle de L. Favre est simplement ridicule. Ces conventions sont matériellement impossibles dans une société qui compte environ deux cents membres. En réalité, il n'a jamais été question de rien de semblable dans la société L. Favre et Cie. »

(2) Ce prix diffère de celui de 2,416 fr. que nous donnons dans le tableau de la page 134, colonne 2, par les causes suivantes : 1° Augmentation de 96 fr. provenant de ce que M. Bridel compte le florin à 2 fr. 20 au lieu de 2 fr. 10; 2° 74 fr. représentant l'augmentation moyenne de 3 1/2 °/₀ demandée par les entrepreneurs sur les prix de la série; 3° 58 fr. provenant de ce que l'amortissement et l'intérêt des installations mécaniques coûtent 467 fr. au Saint-Gothard, au lieu de 409 francs portés pour l'Arlberg.

type avec revêtement minimum, tandis qu'il coûtait 3,630 fr., soit 37 % de plus. Voici ce qu'il a écrit à ce sujet dans sa brochure du mois d'octobre 1882 :

« Il est indubitable que le principal facteur de cette » différence des prix de revient, que l'on ne saurait » expliquer sans cela, réside dans la différence des » méthodes appliquées. Or, il paraît que les prix de » l'Arlberg sont rémunérateurs, tandis que l'entreprise » du Gothard affirme avoir subi une grosse perte. »

J'ai fait, de mon côté, au sujet de ces travaux, quelques recherches que je vais résumer, parce qu'elles confirment pleinement, à mon avis, les opinions émises par M. Bridel.

1° Journées employées. — Voici d'abord un tableau dressé d'après les renseignements contenus dans les rapports du conseil fédéral et indiquant par année le cube des déblais excavés et le nombre des ouvriers existant sur les chantiers.

ANNÉES	CUBES EXCAVÉS	Nombre moyen d'ouvriers occupés par jour	OBSERVATIONS
1872	19.000	181	Les cubes indiqués représentent seulement le vide normal du tunnel de 45 mètres cubes par mètre courant, il faut donc ajouter au cube total de 672,500 mètres celui des maçonneries soit 120,000 mètres cubes pour avoir le cube total réellement excavé.
1873		840	
1874		1.740	
1875	57.000	2.843	
1876	83.000	3.117	
1877	105.000	3.305	
1878	117.000	2.940	
1879	100.000	2.695	
1880	90.000	3.024	
1881	70.000	2.580	
TOTAUX	672.500	23.265	

Si l'on multiplie le nombre total d'ouvriers par 365

jours, on trouve qu'il aurait été fait 8,491,725 journées, soit 567 journées d'ouvriers par mètre courant de tunnel. Ce chiffre est exorbitant et justifie à lui seul tout ce que M. Bridel a dit du désordre et des pertes de temps qui se sont constamment produits sur les chantiers par suite de leur mauvaise organisation. En appliquant à ces 567 journées un prix moyen de 3 fr. 75 (1), on obtient une somme de 2,126 fr., représentant par mètre courant de tunnel, la dépense faite en main-d'œuvre seulement.

2° Dynamite consommée. — On a consommé en moyenne 21k6 de dynamite par mètre courant de galerie de direction, soit 3k1/2 par mètre cube excavé. M. Stockalper dit que cette quantité a varié de 18 à 30 kilog. par mètre courant, suivant la dureté de la roche. (Voir la *Revue générale des Chemins de fer* de mars 1882.)

La consommation moyenne pour l'ensemble du tunnel paraît avoir été de 1k30 par mètre cube excavé, soit 70 kilog. par mètre courant de tunnel et par conséquent 1 kilog. par mètre cube de l'abattage en dehors de la galerie d'avancement.

Dans les petits tunnels des lignes d'accès, on a consommé en moyenne 2 1/2 kil. de dynamite par mètre cube de la galerie d'avancement.

3° Frais généraux. — Suivant M. Bridel, comme nous l'avons déjà dit, les frais généraux de l'entreprise s'élevaient à 186,000 fr. par mois, soit 2 millions 232,000 fr. par an. Or, comme dans les années les plus actives on a fait 100,000 à 120,000 mètres

(1) Ce prix est emprunté au Mémoire du département fédéral des Chemins de fer de 1886-1887.

cubes d'excavation, il s'ensuit que le mètre cube de déblai coûtait environ 20 fr. rien que pour les frais généraux, ou, en d'autres termes, que ces frais figurent pour 1,000 fr. dans le prix du mètre courant de tunnel. Il est fâcheux que M. Bridel n'ait pas donné le détail de cette grosse somme afin de faire mieux comprendre les nombreux vices que présentait l'organisation de l'entreprise.

M. Rambert, dans le *Rapport final* sur la liquidation de l'entreprise (année 1885), déclare que les *frais constants* de l'entreprise étaient de 180,000 à 200,000 fr. par mois et comprenaient les intérêts des capitaux, les installations, les ateliers extérieurs, le service des transports, les hôpitaux, les frais généraux, etc., etc.

4° Intérêts des capitaux. — D'après les déclarations mêmes de son avocat, l'entreprise a payé 3,740,000 francs pour intérêts des capitaux qu'elle a empruntés, savoir :

A la Compagnie du Saint-Gothard pour ses avances de fonds ..... 2.400.000 fr.

A divers créanciers et capitalistes pour intérêts et commissions..... 1.340.000 fr.

Cette dépense correspond à 250 francs par mètre courant de tunnel, chiffre relativement très élevé. On comprend, en effet, qu'au début Louis Favre ait emprunté 6 ou 7 millions pour constituer le matériel et le fonds de roulement et ait ainsi payé pendant deux ou trois années au plus un intérêt de 350,000 francs par an ; mais il aurait dû éteindre rapidement cette dette, car ses prix étaient très avantageux, surtout

pour les premiers kilomètres à exécuter ; de plus, la Compagnie lui a payé pendant trois ans, comme on l'a vu, un prix de 1,300 francs par mètre courant de galerie d'avancement, ce qui devait lui laisser 1,000 francs de bénéfice, puisque pour ce même travail les entrepreneurs de l'Arlberg n'ont reçu que 315 francs.

5° Matériel de l'entreprise. — D'après le marché de l'entreprise, la Compagnie fournissait les fonds nécessaires pour les installations mécaniques et en restait provisoirement propriétaire, mais l'entrepreneur devait rembourser ces avances avec intérêt à 5 0/0 à l'achèvement des travaux. Le 6 juin 1874, L. Favre déclara, dans une convention spéciale, qu'il se chargeait des installations pour le prix à forfait de 4 millions ; mais, le 6 février 1877, il déclara que ces installations lui avaient coûté 6,250,000 francs.

M. Meyer donne les détails suivants sur le matériel que possédait l'entreprise Favre (*Brochure de* 1888).

		TOTAUX	Par mètre courant de tunnel
		francs	francs
1° Immeubles			
Immeubles	1.034.182 79	1.161.546 28	77 40
Terrains	127.363 49		
2° Outillage ordinaire			
Outils et engins	265.582 02		
Voies et matériel fixe	499.934 91		
Matériel roulant	744.578 36	1.680.945 98	112 »
Écuries et chevaux	107.588 91		
Mobilier	63.261 78		
3° Installations mécaniques			
Conduites et prises d'eau	1.524.225 58		
Machines fixes	1.550.953 04		
Machines-outils	118.827 62	3.777.027 06	252 »
Perforatrices et affûts	583.020 82		
TOTAL		6.619.519 32	441 40

M. Stockalper dit que toutes les installations de l'entreprise ont coûté environ 6 1/2 millions (*Revue générale des Chemins de fer*, mars 1882). Il paraît donc d'accord avec M. Meyer sur la valeur de ce matériel.

M. Deharme dit que le matériel du Saint-Gothard valait 9 millions et qu'on espérait en retirer 1 1/2 million après l'achèvement des travaux. Ces chiffres sont évidemment erronés (*Revue générale des Chemins de fer*, novembre 1880).

On voit que les installations mécaniques, y compris les immeubles qui en font généralement partie, reviennent à 329 francs par mètre courant de tunnel. Si l'on ajoute à cette somme ses intérêts au taux de 5 % pendant 8 ans, on aura en tout 460 francs comme dépense par mètre courant, imputable aux installations mécaniques. Ce chiffre est un peu supérieur à celui de l'Arlberg que nous estimons plus loin à 409 francs ; il diminue naturellement avec la longueur du tunnel mais augmente avec la durée des travaux qui accumule les intérêts.

On voit aussi par ces exemples que *lorsqu'on a des chutes d'eau convenables à sa disposition*, la dépense pour les installations mécaniques varie peu lorsqu'il s'agit de tunnels ayant 10 à 20 kilomètres de long et que dans ce cas *l'accélération de vitesse donnée aux travaux par des procédés mécaniques de perforation n'augmente le prix ordinaire des tunnels que d'environ 400 fr. le mètre courant.* Ce chiffre est même exagéré, car il faut en déduire la valeur du matériel après l'achèvement des travaux, ce qui réduirait sans doute ce chef de dépense d'environ 20 %.

A la fin de 1880, il fut question de liquider l'entreprise L. Favre et de lui substituer, à partir du 1er mai 1881, la Compagnie du Saint-Gothard. Dans les négociations qui eurent lieu à ce sujet, mais qui échouèrent, l'entreprise demandait une somme de 4 millions pour le prix de ses installations, soit 60 % de ce qu'elles avaient coûté. La Compagnie offrit d'abord 1 ½ millions, soit 23 %, puis, en dernier lieu, 2 millions, soit 30 %, et l'entreprise réduisit sa demande à 3 ½ millions. Cette somme devait, d'ailleurs, comprendre et éteindre toutes les réclamations de l'entreprise.

3° TUNNEL DE L'ARLBERG

Les documents publiés en France et en Suisse sur l'Arlberg sont très laconiques et incomplets, ils sont souvent contradictoires ou erronés. Il est bien fâcheux qu'un travail aussi important et intéressant n'ait pas été l'objet de rapports mensuels détaillés, analogues à ceux qu'a publiés le Conseil fédéral suisse pour le Saint-Gothard.

N'ayant pu recourir à des sources officielles pour étudier cette affaire, il est possible que quelques-uns des faits que je vais exposer manquent d'exactitude ou de précision (1).

(1) Voici les publications que j'ai consultées au sujet de ce travail : Brochures de M. Meyer, ingénieur en chef de la Suisse Occidentale, années 1882 et 1888. — *Annales des Ponts et Chaussées et des Mines* (année 1884, mémoire Revaux). — *Bulletins de la Société des Ingénieurs civils de Paris.* — Journal le *Génie Civil* (1884). — Les *Nouvelles Conquêtes de la Science*, par Figuier, 1885. — Note de M. Kovatsch, professeur à Brünn, Berlin, 1883. — Rapport du direc-

Le tunnel de l'Arlberg a 10,260 mètres de longueur et est en ligne droite ; de l'ouest à l'est il présente une rampe de 15 ‰ sur 6,355 mètres, suivie d'une pente de 2 ‰ sur 4,100 mètres. Le chemin de fer dont il fait partie a été étudié dès 1860. Sa construction a été décidée en principe en 1870 à la suite de la guerre franco-allemande, qui a fait reconnaître à l'Autriche l'utilité d'une communication directe avec la Suisse sans passer par l'Allemagne.

En 1872, cinq projets furent mis en discussion. Ils comprenaient des tunnels dont la longueur variait de 5,518 mètres à 12,400 mètres. Ce dernier, qui était coudé, avait pour but d'éviter les roches cristallines et de placer le tunnel tout entier dans les roches calcaires. A cette époque, ce projet était considéré comme le meilleur, parce qu'on pensait que son exécution exigerait beaucoup moins de temps et de dépenses qu'un tunnel à travers les roches cristallines.

La crise financière de 1873 arrêta cette affaire, mais elle fut reprise et discutée de nouveau en octobre 1879 par une commission spéciale. De vives discussions eurent alors lieu entre les partisans d'un grand tunnel rectiligne et à deux voies de 10,270 mètres de long, situé à la cote maximum de 1,310 mètres et ceux d'un tunnel à une voie de 7,000 mètres de long placé à la cote maximum de 1,389 mètres. — On renonça d'ailleurs à l'idée de faire un tunnel coudé

teur des Chemins de fer Julius Lott (Vienne), janvier 1881. — Note de M. Prenninger, directeur des Chemins de fer du Sud (Vienne), février 1880. — Quatre conférences de M. Plate, inspecteur des Chemins de fer. Vienne, 1884, etc., etc.

dans les calcaires, parce que les travaux du Saint-Gothard avaient démontré, depuis 1872, que le percement des roches cristallines pouvait se réaliser avec une grande rapidité.

Avec le grand tunnel, la ligne à construire entre Innsbruck et Bludenz, avait en tout 136^{k}6 de long et coûtait 75 millions, tandis qu'avec le petit tunnel, la longueur était de 142 kilomètres et la dépense de 64,388,000 francs. Ce dernier projet offrait donc une économie de construction de 10,612,000 francs, non compris les intérêts.

On estimait que le grand tunnel à deux voies coûterait 3,320 francs le mètre courant et que le petit tunnel à une seule voie ne coûterait que 2,573 francs.

Le tracé avec le grand tunnel obtint la majorité des voix et le 7 mai 1880, une loi chargea le gouvernement d'exécuter la ligne de l'Arlberg. Le 24 juin 1880, les travaux du tunnel furent commencés à la main.

Le 12 décembre 1880, les travaux furent adjugés à deux entrepreneurs différents qui ont occupé chacun une des têtes du tunnel. Leurs marchés portaient ce qui suit :

1° A partir du 1er février 1881, l'avancement par jour devait être de 3^{m}30 à chaque tête.

2° Le percement devait être fait pour le 1er février 1885, soit au bout de 4 ans. — Il a eu lieu le 13 novembre 1883.

3° Le tunnel devait être complètement achevé pour le milieu d'août 1885. — Il a été terminé le 31 mai 1884.

4° L'extrémité du tunnel complètement achevé ne

devait jamais être à plus de 600 mètres *du front de taille*.

5° Il y avait une pénalité de 1,680 fr. (800 fl. au change de 2 fr. 10) par jour de retard et une prime de même somme pour chaque jour d'avance sur les délais prescrits.

La perforation mécanique a commencé le 13 novembre 1880 et le tunnel a été percé le 13 novembre 1883, soit trois ans après. Il a été inauguré le 19 novembre 1883 et achevé le 31 mai 1884, soit six mois et demi après le percement. La durée totale du travail a donc été de quatre ans et trente-cinq jours (du 24 juin 1880 au 31 mai 1884). On voit que le *percement* a eu lieu avec une avance de un an et quatre-vingts jours, soit une réduction de temps de 30 % sur l'époque prescrite.

A la fin de 1881, on avait déjà dépensé 12 millions 850,000 francs sur la traversée de Innsbruck à Bludenz. Cette somme comprenait 7,553,315 francs pour le tunnel, savoir : 4,925,367 fr. pour les travaux souterrains, 1,135,195 fr. pour bâtiments et 1,492,753 fr. pour les machines.

Nature du terrain. — Les vallées de Rosana et de l'Alfenz que suit le chemin de fer sont dirigées exactement de l'est à l'ouest et forment la limite même entre les roches cristallines placées au sud et les roches sédimentaires placées au nord. Celles-ci comprennent d'abord un banc épais de verrucano que les géologues autrichiens rapportent à l'époque permienne et qui est en contact immédiat avec le micaschiste. Au-dessus du verrucano on trouve une série

de bancs de schistes et de calcaires divers qui appartiennent à l'époque du trias.

Aucune coupe géologique n'a jusqu'ici été communiquée au public pour lui faire connaître la nature exacte et l'épaisseur des diverses couches de terrain rencontrées dans les travaux.

A-t-on chargé ici comme au Saint-Gothard un géologue de suivre attentivement les travaux pour constater journellement ce qu'ils ont révélé d'intéressant pour la sience? Je l'ignore. C'est là une lacune des plus regrettables, car elle empêche d'apprécier l'importance des difficultés rencontrées et d'en tirer des conclusions pour les grands tunnels à faire ultérieurement.

Voici tout ce qu'on sait, *grosso modo*, sur la nature des terrains traversés.

Dans la *région Est* du tunnel, on a trouvé des schistes micacés plus ou moins riches en quartz et en grenats et plus ou moins durs suivant la proportion de quartz qu'ils renferment. On a également trouvé quelques couches de gneiss et notamment au delà des deux premiers kilomètres où l'on traverse un massif de gneiss qui n'apparaît pas au jour. Toutes ces roches se sont montrées généralement solides et sèches, mais il paraît qu'on a néanmoins dû boiser presque partout pour éviter des éboulements. On n'a d'ailleurs trouvé de mauvais terrains que sur quelques points de peu de longueur.

Dans la *région Ouest*, le quartz est moins abondant et le mica domine. Ce qui caractérise cette région,

devai... ...ez grandes longueurs
taille. ...nés, fissurés en tous
5° : ...parsemés de lits d'ar-
chang... ...le graphite très dur,
de m... ...filtrations d'eau. Ces
délais... ...retardé les travaux et
La ... le forage mécanique
veml... ...est ce qui a eu lieu
1883, ...depuis le mois de no-
veml... ...1881. Ces mauvais ter-
et d... ...es de la tête ouest et ont
trava... ...ron 3 kilomètres.
jours
le *p*... ...*Civil*, on aurait dé-
qua... ...bois par mètre cou-
30 ... ...es. Presque partout
...aire immédiatement en
A ...boisages très solides et
850, ...eurs points, placer des
den... ...boisages se sont trouvés
le t... ...placer ou les refaire.
ter... ...déterminé des éboule-
pou...

N ...ayant 2m75 sur 2m50,
de l... ...et mécaniquement. Une
tem... ...2 mètres et placée au
enti... ...à la main.
rocl... ...se sont rencontrées les
pre...
géo...
nie... — Par suite de la
sch... ...longueur de galerie

percée du côté ouest où l'on a employé la machine Brandt, n'a été que de 4,762 mètres, tandis qu'elle a été de 5,498 mètres du côté est où l'on a employé la machine Ferroux. L'avancement moyen journalier n'a ainsi été au total que de 3^m848 au côté ouest, tandis qu'il a été de 4^m442 au côté est.

C'est dans l'année 1883 que les avancements ont été le plus fort et en moyenne par jour de 5^m425 pour le côté est et 5^m690 pour le côté ouest.

L'avancement journalier maximum obtenu d'un côté pendant tout le courant des travaux a atteint 7^m98, tandis qu'il n'a été que de 6^m90 au Saint-Gothard et 2^m90 au Mont-Cenis.

La machine Brandt a donné pendant plusieurs mois en 1883 un avancement moyen de 6^m15 par jour.

On a percé à la main 435 mètres, soit 208 mètres à la tête est et 227 mètres à la tête ouest.

On a percé mécaniquement 9,825 mètres dont 5,290 mètres à l'est et 4,535 mètres à l'ouest.

Dans la partie ouest où le terrain était mauvais, l'avancement en 1881 a été de 30 % inférieur à celui de la partie est ; en 1882, il lui était encore inférieur de 17 %, mais en 1883 le terrain étant redevenu semblable à celui de la galerie est, il y a eu au contraire à l'ouest, un avancement de 5 % plus fort qu'à l'est, car de ce côté-ci l'avancement n'a été, en moyenne par jour, que de 5^m425, tandis qu'il a été de 5^m69 à l'ouest. — Ce fait paraît dû à la supériorité de la machine Brandt sur la machine Ferroux.

Le tableau suivant fait connaître l'avancement annuel des deux galeries de direction.

ANNÉES	CÔTÉ EST AVANCEMENTS		CÔTÉ OUEST AVANCEMENTS	
	ANNUELS	Moyens par jour	ANNUELS	Moyens par jour
	Mètres	Mètres	Mètres	Mètres
1880	86 80	2.800	114 50	2.420
1881	1.771 »	4.852	1.247 90	3.419
1882	1.914 20	5.217	1.580 40	4.329
1883	1.726 »	5.425	1.819 50	5.690
TOTAUX.	5.498 »		4.762 80	
Moyennes..	1.756 60	4.442	1.400 82	3.848

Maçonneries. — Il résulte de la série des prix et autres documents qui ont servi de base à l'adjudication des travaux et dont nous nous occupons plus loin (page 131), qu'on avait prévu un cube moyen de maçonnerie de 14 à 15 mètres cubes par mètre courant de tunnel. Sur la moitié de sa longueur, l'épaisseur de la voûte à la clef ne devait pas dépasser 0m50, mais en réalité, par suite des mauvais terrains rencontrés, le cube des maçonneries a été de 286,000 mètres, soit de 28 mètres cubes par mètre courant de tunnel, c'est-à-dire le double de ce qu'on avait prévu. Le cube total des déblais a été de 785,000 mètres environ, soit 76 1/2 mètres par mètre courant de tunnel. (1) — M. Plate, dans une conférence en date

(1) Voir les conférences techniques faites à Vienne, de 1881 à 1883, par M. Plate, inspecteur des chemins de fer de l'Etat.

du 18 décembre 1883, dit que des voûtes de 1m20 d'épaisseur étaient presque la règle dans la partie ouest du tunnel. Il est résulté de ces faits que le prix prévu pour le tunnel a été augmenté d'environ 900 fr. par mètre courant, somme correspondant à 13 mètres cubes de maçonneries supplémentaires, au prix de 67 fr. 50, y compris le déblai.

M. Bridel, dans sa brochure du mois d'octobre 1882, donne les renseignements suivants, correspondants à la date du 31 juillet 1882 :

1° Dans la galerie est, la maçonnerie était achevée sur 2,325m90 et l'épaisseur de la voûte dépassait rarement 0m50 dans cette région. Les anneaux étaient construits par longueur de 8 mètres.

2° Dans la galerie ouest, au contraire, où les maçonneries n'étaient achevées que sur 1,358m80, l'épaisseur de la voûte était au minimum de 0m80. — 33 anneaux avaient 0m90 et 15 anneaux 1 mètre d'épaisseur minimum à la clef de voûte. On avait aussi fait un radier de 0m80 d'épaisseur sur 60 mètres de longueur. — Les anneaux de maçonnerie n'avaient ici que 6 mètres de longueur en moyenne.

Ces renseignements sont les seuls que j'ai pu trouver sur ce sujet. Il serait fort à désirer que cette question importante fût élucidée complètement et que les ingénieurs autrichiens fissent connaître les raisons et les règles qu'ils ont suivies pour déterminer les dimensions exceptionnelles qu'ils ont jugé convenable de donner aux maçonneries, et qui semblent exagérées.

Chaleur. — La température de la roche et de l'air

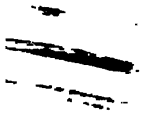
dans les chantiers a dû être fort modérée, puisque l'épaisseur du terrain au-dessus du tunnel ne dépasse pas 800 mètres.

Eaux. — La partie est du tunnel paraît avoir été généralement sèche, mais il n'en a pas été de même dans la partie ouest; on n'a cependant pas rencontré ici de sources abondantes, mais seulement des infiltrations nombreuses qui se sont produites dans les parties argileuses et sur les points où la roche était crevassée, et notamment au voisinage des ruisseaux qui coulaient à la surface du sol au-dessus du tunnel. On a rencontré aussi des poches d'eau assez considérables qui se vidaient en quelques heures ou en quelques jours et ne donnaient plus ensuite qu'une très faible quantité d'eau. La plus importante de toutes ces poches a mis quatre jours pour se vider et a débité pendant ce temps 900 litres à la minute.

FRAIS DE CONSTRUCTION DU TUNNEL DE L'ARLBERG

Traité à forfait. — Au lieu de faire un traité à forfait comme au Saint-Gothard, les ingénieurs autrichiens ont dressé une série de prix assez détaillée pour pouvoir payer à l'entrepreneur tous les travaux qu'il ferait et être libres ainsi d'exécuter ces travaux à meilleur marché et dans les meilleures conditions possibles.

Les traités à forfait comme celui du Saint-Gothard sont généralement des oreillers de paresse pour les administrateurs et les ingénieurs qui désirent déga-



· mettre à l'abri de tout
ıtrepreneur est seul respon-
ıic n'a à craindre aucun mé-
prouve qu'il n'en est point
· à forfait cachent généralement
nême des tripotages financiers ;
ucune utilité des bénéfices consi-
preneurs et donnent lieu à des pro-
éreux pour les Compagnies ; aussi,
·i sont bien administrées, elles se
·oin de faire des traités de cette nature.
ıeurs autrichiens n'ont pas suivi sous ce
·xemple du Saint-Gothard, et ils n'ont pas
ıutre laisser à des entrepreneurs plus ou
ıtiniers, la liberté d'organiser à leur idée les
qui leur étaient confiés ; mais ils ont stipulé
ıtraire avec soin de quelle manière les chantiers
ıent être organisés. Les mesures prescrites à cet
ıd sont d'ailleurs fort simples et peuvent se résu-
·r comme suit (marché du 12 décembre 1880) :

Organisation des chantiers. — 1° La galerie de direction devait être percée à la base du tunnel au moyen de machines perforatrices ayant pour but de hâter son exécution.

2° Une seconde galerie devait être faite à la calotte dans le but de faciliter et d'activer l'excavation générale du tunnel ainsi que la construction des maçonneries.

3° L'entrepreneur était obligé d'organiser ses chantiers de manière qu'il n'y eût jamais plus de 600 mètres de distance ou 180 jours de retard entre le

de direction et le tunnel complè-
— L'extrémité de la galerie de faîte ne
à plus de 100 mètres en arrière de
de base.

faire à chaque tête un avancement
de 3m30 par 24 heures.

qui a fait construire le tunnel
faire toutes les installations dont il
Les entrepreneurs ne fournissaient
ordinaire, ainsi que les perforatrices,
Cette combinaison laissait le Gou-
de la situation et lui permettait de
les travaux et de les continuer sans perdre de
L'entrepreneur ne remplissait pas ses engage-
outre l'avantage de décharger l'en-
de se procurer les grands capitaux
ces installations ainsi que des intérêts
souvent considérables qui en résultent et
seraient retombés sur l'Etat. Il résul-
de cette combinaison que des entrepreneurs
ayant un capital restreint pouvaient
des travaux et produire lors de l'adjudica-
une concurrence favorable aux intérêts de l'Etat.

Les travaux, au lieu d'être confiés en entier à un
entrepreneur, étaient divisés entre deux entre-
distinctes placées à chacune des têtes du

Série de prix. — Les prix étaient également fort
et en harmonie avec le système prescrit pour
des travaux. Ils sont énumérés dans le

tableau suivant qui n'est pas complet, mais qui suffit pour donner une idée exacte de la série des prix :

N° d'ordre	DÉSIGNATION DES TRAVAUX	PRIX du mètre courant		LONGUEURS prévues		VALEURS
		1er kilomètre	kilomètre moyen	effectives	p. 0/0 du total	
		Fr.	Fr.	mètres		
1	Galerie d'avancement inférieure, 2m75 sur 2m50, surface 7 mètres	315	357	10260		3.646 390
2	Galerie supérieure, 2 mètres sur 2m30, surface 4m60	210	231	10260		2.372 370
	Pour achever le tunnel (mais non compris les maçonneries de l'aqueduc ni le ballast), on paye, en outre des prix ci-dessus, les prix suivants, correspondant à divers types du muraillement.					
3	Tunnel sans revêtement, mais avec excavation préparée pour un revêtement de 0m50 d'épaisseur	840 »	924 »	617	6	570 108
4	Tunnel avec revêtement de 0m50 pour la voûte et les pieds-droits	1239 »	1365 »	2052	20	2.800 980
5	Idem. Voûte de 0m50, pieds-droits de 0m80 d'épaisseur.	1407 »	1554 »	2155	21	3.348 870
6	Idem. Voûte de 0m65, pieds-droits de 0m95 d'épaisseur.	1596 »	1764 »	3560	34 7	6.279 840
7	Idem. Voûte de 0m85, pieds-droits de 1m10 d'épaisseur.	1852 »	2062 »	759	7 4	1.565 058
8	Idem. Voûte de 0m85, pieds-droits de 1m10 d'épaisseur et radier de 0m65	2289 »	2520 »	102	1	257 040
9	Idem. Voûte de 0m80, pieds-droits de 1m10 d'épaisseur en appareil sans radier.	2562 »	2814 »	411	4	1.156 554
10	Idem. Voûte de 0m80, pieds-droits de 1m10 d'épaisseur en appareil avec radier de 0m65	2961 »	3255 »	102	1	332 010
1	Idem. Voûte de 0m90, pieds-droits de 1m25 d'épaisseur sans radier	2919 »	3213 »	400	3 9	1.285 200
12	Idem. Voûte de 0m90, pieds-droits de 1m25 d'épaisseur avec radier	3423 »	3759 »	102	1	383.418
13	Maçonnerie du canal (type moyen)	42 »	46 20			474 474
	TOTAUX			10260	100 »	24.472 312
14	Petite niche, l'une	94 50	104 »			
15	Petite chambre d'équipe	661 50	727 »	environ		227.688
16	Grande chambre d'équipe	2709	2980 »			
17	Ballastage de la voie le m. c.	15 75	17 30			
	TOTAL GÉNÉRAL					24.700.000

NOTA. — Ce tableau est extrait de la note publiée par M. l'ingénieur Meyer dans le *Bulletin des ingénieurs-architectes Vaudois*, de mars 1882.

OBSERVATIONS. — 1° Ce tableau a été dressé en arrondissant les chiffres pour simplifier les calculs.

2° Les longueurs indiquées sont celles qui ont servi à l'adjudication et qui avaient été déduites des explorations géologiques.

3° Avec une épaisseur de 0m50 pour les maçonneries (type n° 4), le cube des maçonneries est de 9 mètres et le cube total de l'excavation est de 57 mètres y compris les fouilles de l'aqueduc, mais non compris celle de la couche de béton posée sur la plate-forme. Avec le type n° 6, épaisseur de 0m65 à la clef de voûte, ces cubes sont respectivement de 15 et 62 1/2 mètres par mètre courant.

4° Les prix indiqués en francs dans le tableau ci-dessus ont été calculés en donnant au florin sa valeur réelle, soit 2 fr. 10. Il importe de remarquer à ce sujet que les prix donnés en francs par divers écrivains sont souvent contradictoires ou inexacts, parce qu'ils ont été calculés en donnant au florin tantôt une valeur de 2 fr. 10, tantôt la valeur nominale de 2 fr. 50.

Les prix de la série ci-dessus paraissent avoir été établis sur les bases suivantes :

a) — Excavation des deux petites galeries, prix du mètre cube 45 francs pour le premier kilomètre.

b) — Abattage en dehors des petites galeries 18 fr. 50 le mètre cube pour le premier kilomètre. Ce prix se déduit de celui de 840 francs porté au n° 3 et divisé par le cube correspondant, soit 45 m. 50 (1).

(1) Les travaux faits en dehors des *plans types* étaient payés suivant une série de prix spéciale, qui pour les excavations portait ce qui suit :

« ART. 21. — Pour l'excavation dans les parties où la galerie de base et celle de faîte sont percées dans n'importe quelle espèce

c)—Le prix moyen par mètre cube de maçonnerie était de 44 fr. 50. Ce prix se déduit de ceux qui figurent aux nos 3 et 4 du tableau.

d)—Prix spéciaux pour le mètre courant des maçonneries de l'aqueduc ainsi que pour les niches et le ballastage.

e)—Majoration des prix précédents à raison de 5 °/₀ pour chaque kilomètre d'avancement au delà du premier, de sorte que le travail qui est payé 100 francs sur le premier kilomètre était payé 105 francs sur le deuxième, 110 francs sur le troisième, et ainsi de suite.

Il résulte de cette majoration que le prix moyen définitif appliqué à chaque entreprise de l'Arlberg était de 10 °/₀ supérieur au prix fixé pour le premier kilomètre.

Cette majoration a évidemment eu pour but de tenir compte des frais de transport qui augmentent avec la distance. Il est facile de voir qu'elle représente pour chaque kilomètre une augmentation d'un franc environ par mètre cube de déblais et de 2 francs par mètre cube de maçonnerie. Ce dernier prix est plus élevé que celui des déblais parce que les transports relatifs aux maçonneries offrent plus de sujétion et sont plus coûteux que ceux des déblais ordinaires. Ces prix sont environ le double de ceux qu'on paye pour les transports au jour, ils paraissent donc raisonnables.

5° Les entrepreneurs étaient soumis à une retenue de 1,680 francs (800 florins, au change de 2 fr. 10)

« de roche, que ce soit pour le profil du tunnel ou de ses revête-
« ments, niches, chambres ou canal, y compris les boisages,
« transports, régalages, etc. pour le premier kilomètre le mètre
« cube 8 florins (16 fr. 80) ; augmentation par kilomètre, le mètre
« cube 40 kz. (0 fr. 84). »

Le prix de 16 fr. 80 est de 10 0/0 plus faible que le prix normal de 18 fr. 50 que nous avons déduit des prix généraux d'application.

pour chaque jour de retard sur la date prévue pour l'achèvement des travaux. Ils avaient en échange une prime de même somme pour chaque jour d'avance sur cette date. Cette prime est sensiblement la même que celle allouée par la France pour activer le percement du Mont-Cenis.

6° Le cautionnement était pour chaque entrepreneur de 300,000 florins, soit 630,000 francs.

Devis estimatif du tunnel de l'Arlberg. — Comme application de la série des prix et pour se rendre mieux compte du coût des travaux, j'ai établi dans le tableau suivant le prix du mètre courant de tunnel dans deux hypothèses : celle d'un revêtement en maçonnerie de 0m50 d'épaisseur (type n° 4), et celle d'un revêtement ayant 0m65 à la clef de voûte (type n° 6).

DÉSIGNATION DES TRAVAUX	ÉPAISSEUR DES MAÇONNERIES DE LA VOUTE			
	0m50 à la clef		0m65 à la clef	
	1er kilomètre	kilomètre moyen	1er kilomètre	kilomètre moyen
	1	2	3	4
	Fr.	Fr.	Fr.	Fr.
1° Excavations				
a) Galerie de base 7m2.....	315	357	315	357
b) Galerie supérieure 4m260...	210	231	210	231
c) Abattage (à 18 fr. 50 le mètre cube pour le 1er kilomètre).....	840	924	943	1.037
d) Installations mécaniques évaluées à 3½ millions. — Amortissement et intérêts à 5 0/0 pendant 4 ans, soit au total 4,200,000 francs répartis sur 12,250 mètres courants.	409	409	409	409
TOTAUX.....	1.774	1.921	1.877	2.034
2° Maçonneries				
A 44 fr. 50 le mètre cube pour le 1er kilomètre.....	400	440	667	734
3° Aqueducs-Niches.....	50	55	50	55
TOTAUX.....	2.224	2.416	2.594	2.823

OBSERVATIONS. — 1° Le type avec 0m50 d'épaisseur moyenne de maçonnerie est sensiblement celui qui a été exécuté au Saint-Gothard ; on peut en conclure que si ce dernier tunnel avait été aussi bien dirigé que celui de l'Arlberg, il n'aurait coûté que 2,630 francs le mètre courant.

Ce chiffre s'établit en prenant le prix du premier kilomètre, soit 2,224 francs et en l'augmentant :

a)—de 15 °/₀, d'après l'échelle admise à l'Arlberg, qui consiste à augmenter les prix de 5 °/₀, à partir des deux têtes pour chaque kilomètre d'avancement dans le tunnel, soit 234 fr.;

b)—En ajoutant encore 3 1/2 °/₀ pour l'augmentation accordée aux entrepreneurs sur les prix de la série, soit 78 francs.

Le Saint-Gothard ayant coûté, dit-on, près de 4,000 francs, on voit que, toutes choses égales d'ailleurs, il aurait dans ce cas coûté environ 50 °/₀ de plus que si on lui avait appliqué les prix de l'Arlberg. D'après les calculs de M. Bridel (voir page 114), l'excédent de dépenses au Saint-Gothard aurait été réellement de 37 °/₀ sur les prix prévus pour l'Arlberg.

2° Les prix portés dans les colonnes 3 et 4 correspondent au type moyen qui avait été prévu avant l'adjudication des travaux. Le tableau fait voir que, d'après ces prévisions, le tunnel ne devait coûter que 2,823 francs, y compris les installations mécaniques, et 2,414 francs sans ces installations. Ce dernier chiffre est sensiblement égal à celui qu'on obtient en divisant par 10,260 mètres la somme totale : 24 millions 472,312 fr., figurant au tableau de la page 131.

3° Il résulte des prix portés au tableau ci-dessus,

que l'augmentation de dépenses par kilomètre est d'environ 110 fr. par mètre courant, sur le prix du premier kilomètre, soit 70 francs pour les déblais et 40 francs pour les maçonneries. On a vu qu'au Mont-Cenis la Commission d'étude avait estimé qu'à chaque kilomètre d'avancement il fallait augmenter de 90 fr. le prix du mètre courant du tunnel. Les ingénieurs autrichiens sont donc d'accord avec les Italiens sur cette question importante. Les ingénieurs autrichiens ont admis, avec toute raison, que la longueur d'un tunnel n'avait pas d'autre influence notable sur le prix des travaux que celle résultant de l'allongement des transports (1). Il n'est donc pas exact de dire, comme certains écrivains incompétents, que *le coût et les difficultés provenant de la longueur, ne croissent pas comme cette longueur, mais comme son carré et même plus* (Voir Figuier, les *Nouvelles Conquêtes de la science*, page 361).

Dynamite consommée. — La consommation de dynamite par mètre cube a été, en moyenne, de 2 kilog. 76 dans la galerie de direction, percée à l'est avec la machine Ferroux. Cette galerie avait une section de 7 mètres carrés. Il paraît qu'avec la machine Brandt, travaillant à l'ouest, la consommation de dynamite aurait été moindre et de 2 kilog. 33 seulement (2).

Dans la galerie supérieure ayant 4^{m}60 de section et

(1) La difficulté d'aérer les chantiers et la température augmentent également avec la longueur des tunnels, mais les dépenses qui en résultent sont généralement englobées et classées avec celles relatives aux installations mécaniques qui ont pour but d'activer le percement du tunnel.

(2) Mémoire du département fédéral des Chemins de fer 1886-87

creusée à la main, la consommation n'était que de 2 kilog. 40 par mètre cube *(Nouvelles Conquêtes de la science,* par Figuier).

On a consommé en tout 800,000 kilogrammes de dynamite pour exécuter le souterrain, soit environ 1 kilogramme par mètre cube excavé.

Installations mécaniques à l'Arlberg. — Ainsi qu'on l'a déjà dit, toutes les installations aux deux têtes du tunnel ont été faites par le gouvernement autrichien, qui, avant l'adjudication des travaux, avait dépensé 653,100 francs à la tête est et 672,000 fr. à la tête ouest, soit en tout 1,325,100 fr. Cette somme se répartit comme suit :

1° Chemins d'accès, places diverses, etc.			99.611 f
2° Canaux, conduites d'eau, force motrice			559.360
3° Machines, conduites d'air, perforatrices			296.671
4° Bâtiments :			
	SURFACES (mètres carrés)	VALEURS (francs)	
a) Maisons diverses d'habitation pour les employés et les ouvriers	2.088	186.936	
b) Hôpitaux	758	71.600	
c) Magasins divers	933	30.392	
d) Ateliers	1.431	80.430	
TOTAUX	5.210	369.358	369.358
TOTAL GÉNÉRAL			1.325.000

En traitant avec les entrepreneurs, le gouvernement s'est engagé à dépenser encore 2,184,000 francs, soit en tout 3,509,100 francs, mais si cette somme ne suffisait pas, les entrepreneurs devaient y suppléer à leurs frais. Suivant M. l'ingénieur Meyer (brochure 1888), cette somme n'aurait été dépassée en exécution que de 47,985 francs.

L'entrepreneur n'avait à sa charge que l'outillage ordinaire, y compris les voies et le matériel de transport ainsi que les perforatrices.

Les travaux qu'on a dû faire pour amener l'eau aux machines motrices sont assez importants, car pour la tête est il a fallu la prendre à 4 kilomètres et demi de distance pour obtenir une chute de 140 mètres de hauteur. A la tête ouest, l'une des prises d'eau était distante de 2,900 mètres et on a dû établir, en outre, une machine à vapeur de 80 chevaux pour suppléer les machines hydrauliques lorsqu'il y aurait insuffisance d'eau.

Coût réel de l'Arlberg. — Les dépenses prévues en 1880 pour la construction du tunnel de l'Arlberg étaient estimées à 12,924,506 florins, soit 28,466,562 francs, ou par mètre courant 2,774 fr. (1) Cette somme peut se décomposer comme suit :

1° Montant du devis représentant les travaux remis aux entrepreneurs (voir page 131)....	24.700.000 fr.
2° Somme dépensée par le gouvernement pour les installations, 1,671,000 florins, soit.....	3.509.100 fr.
3° Pour parfaire les sommes ci-dessus	257.462 fr.
TOTAL.....	28.466.562 fr.

(1) Voir la note de M. l'ingénieur Meyer dans le *Bulletin des ingénieurs et architectes Vaudois*, de mars 1882.

Les dépenses réellement faites s'élèvent à 40,833,300 francs, chiffre officiel (voir la brochure de M. Meyer de 1888). Cette somme peut se justifier comme suit :

N°s d'ordre	DÉSIGNATION DES DÉPENSES	DÉPENSES totales	DÉPENSES par mètre courant
		fr.	fr.
1	Montant du devis soumis à l'adjudication.....	24.700.000	2.408
2	Surépaisseurs données aux maçonneries en dehors des prévisions, 13 mètres cubes par mètre courant, à 67 fr. 50 le mètre cube (49 francs pour la maçonnerie et 18 fr. 50 pour le déblai supplémentaire).....	9.003.150	877
3	3 1/2 °/₀ d'augmentation demandée par les entrepreneurs sur les prix du devis.....	1.178.535	114
4	Primes aux entrepreneurs pour achèvement des travaux un an et quatre-vingts jours avant le délai prescrit.....	1.700.000	166
5	Prix des installations faites par le gouvernement (intérêts non compris).....	3.509.100	342
6	Pour parfaire les sommes ci-dessus, en partie approximatives.....	742.515	72
	TOTAL.....	40.833.300	3.979

Ce prix total de 3,979 francs comprend le ballast de la voie, mais ne comprend pas les frais généraux d'administration ni l'intérêt pendant le cours des travaux des sommes payées aux entrepreneurs, intérêt dont une compagnie industrielle devrait tenir compte et qui, dans le cas de l'Arlberg, aurait augmenté le prix du mètre courant d'environ 5 °/₀, soit 200 francs ; mais en échange il faudrait en déduire la valeur après emploi des installations, qui ont coûté 3 1/2 millions.

Il convient de remarquer que les sommes comprises sous les numéros 1 et 2 du tableau ci-dessus et formant un total de 3,285 francs, représentent approximativement 1,865 francs pour excavation du tunnel soit 76 1/2 mètres cubes, à 24 fr. 40, prix moyen

d'excavation sans les installations), et 1,371 francs pour la maçonnerie proprement dite, soit 28 mètres cubes à 49 fr.

Nous venons de faire une description détaillée des grands tunnels des Alpes et du Jura. Le tableau ci-joint complète l'étude de ces tunnels.

Nous allons maintenant rendre compte des principaux tunnels qui ont été construits en France et en Espagne, nous aurons ainsi une base plus large pour appuyer les conclusions que nous nous proposons de formuler relativement à l'évaluation des frais de construction des tunnels d'une longueur exceptionnelle.

TABLEAU

DONNANT DIVERS RENSEIGNEMENTS STATISTIQUES

SUR LES

GRANDS TUNNELS DES ALPES ET DU JURA

NUMÉROS D'ORDRE	DÉSIGNATION DES TUNNELS	LONGUEURS	COTES DU RAIL		PENTES ET RAMPES p. °/₀₀		Cote maximum du tunnel au-dessus...
			aux deux têtes	sommet dans le tunnel	dans le tunnel	aux abords du tunnel	
		mètres	mètres	mètres			mètres
1	Mont Cenis.....	12.220	1202,8 1335.4	1338	22-½	30-26	294
2	Saint-Gothard.....	14.984	1109-1145	1154	5,8-½-2	25-27	286
3	Arlberg.....	10.260	1215-1302	1310	2-15	22-29	210
4	Sommering.....	1.425	880.6	883	3,3-3,3	25	101
5	Brenner..... ...		1366				
	SIMPLON						
6	*(a)* Projet 1882 par le Val de la Cherasca..	19.795	627-689	708	2-8	7,6-12,5	275
7	*(b)* Projet 1886. Tunnel Coudé.....	16.070	820-830	845.28	2-3	20-25	295
	GEMMI						
	(projet sommaire 1888)						
8	*(a)* Tunnel maximum...	24.000	618-920		12 ½	25	2500
9	*(b)* Tracé intermédiaire.	21.500	820-920	950	2-20	25	2500
10	Tunnel du Credo (près Bellegarde).....	3.965	381-389		4	10-8 ½	65
11	Jougne (près Pontarlier)	1.662	962-997		20	25	102
	JURA NEUCHATELOIS						
12	*(a)* Tunnel des Loges...	3.259	1048,7-991,6	1050	1-25	1-27	133
13	*(b)* Mont Sagne.....	1.355	1047-1048,5		1	27-1	128
	JURA BERNOIS						
14	*(a)* Pierre Pertuis.....	1.294	749-770		1-21-25	17 ½-25	859
15	*(b)* Glovelier	2.009	523-517		1-5	16	836
16	*(c)* La Croix.....	2.966	513-521		1-5 ½	16	813
17	*(d)* Crosettes (près la Chaux-de-Fonds)....	1.617	1016-1040		10-15 ½	22 ½-27	116
18	Hauenstein (près Olten).	2.495	495-562		26 ½	20,8-25	769
19	Boetzberg	2.526	444,5 464,3	454,4	8	12	750

TES exécution	DURÉE d'exécution	OBSERVATIONS
-1871	14 ans 58 jours	Commencé, 1er septembre 1857. Percement, 25 décembre 1870. Inauguration, 17 septembre 1871.
-1880	9 ans 109 jours	Commencé, 4 juin 1872. Traité L. Favre, 7 août 1872. Percement, 29 février 1880. Ouvert à l'exploitation, 1er janvier 1882.
-1883	3 ans 143 jours	Commencé, 14 juin 1880. Percement, 13 novembre 1883. Inauguration 19 novembre 1883. Achèvement en mai 1884. Col de la route cote 1797 mètres.
-1854		La traversée des Alpes au Col du Brenner a lieu sans tunnel et a été inaugurée en août 1867. Ce passage est à la même cote que celui du chemin de fer de Madrid à Irun à la traversée de la chaine granitique du Guadarrama. Il y a ici (à 98 kilomètres de Madrid) un tunnel (La Cañada) de 948 mètres de long.
-1867		
		Longueurs et pentes à fixer après études géologiques et nivellement du terrain.
4-1858		Commencé le 15 juin 1854. Ligne ouverte le 18 mars 1858.
2-1875	3 ans	Commencé en juin 1872. Fini en juin 1875. Ouverture de la ligne le 1er juillet 1875.
6-1860	46 mois	Commencé, 15 mai 1856. Percement, 15 janvier 1860. Inauguration, 15 juillet 1860.
6-1859	32 mois	Commencé, 15 mai 1856. Percement, 25 novembre 1858. Inauguration, 25 novembre 1859.
1-1874	31 mois	Commencé, 1er juin 1871. Achevé 1er janvier 1874. Inauguration, 29 avril 1874.
3-1876	38 mois	Commencé, 25 sept. 1873. Achevé, 30 novembre 1876. Inauguration, 24 mai 1877.
3-1876	40 mois	Commencé, 1er juillet 1873. Achevé, 31 octobre 1876. Inauguration, 24 mai 1877.
6-1888	16 mois	Commencé, 26 août 1886. Percé, 7 juin 1888. Achevé, 31 octobre 1888. Inauguré le 15 novembre 1888.
3-1858	60 mois	Commencé, mai 1854. Percement, 31 octobre 1857. Ouvert à l'exploitation le 1er mai 1858.
1-1875	50 mois	Commencé, 24 mai 1871. Ouvert, 31 juillet 1875.

IV

TUNNELS EXCEPTIONNELS DE LA FRANCE

1° TUNNELS DE SAINT-MARTIN-D'ESTRÉAUX

Le tunnel de Saint-Martin-d'Estréaux, situé sur la ligne de Roanne à Saint-Germain-des-Fossés, a été construit de 1852 à 1857 par l'ingénieur Croizette-Desnoyers, qui a publié en 1859, dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, un mémoire d'où sont extraits les renseignements qui suivent. M. Eugène Flachat a déjà signalé ce travail en 1860 dans son ouvrage sur la *Traversée des Alpes par un chemin de fer.*

La longueur du tunnel est de 1,380 mètres; sur 80 mètres de longueur il traverse un terrain de gord dur ou roche décomposée et sur le reste des porphyres rouges ou des granits porphyroïdes à gros cristaux de feldspath qui, sur certains points, deviennent amphiboliques et passent à une sorte de diorite avec veine de quartz. Cette dernière roche est la plus dure de toutes. Le massif n'est pas compact et doit plutôt

être considéré comme une réunion d'énormes blocs séparés par des lits très minces d'argile et de talc.

Le tunnel est en pente de 1 1/2 pour °/₀₀ sur la moitié environ de sa longueur et en rampe de 3 °/₀₀ sur le reste ; il est à la cote 413^{m}50 ; il a la forme elliptique ; sa largeur, qui est de 7^{m}70 au maximum, n'est que de 7^{m}40 au niveau des rails. La hauteur entre les rails et la clef de voûte est de 5^{m}90. La section de l'Intrados est de 42^{m}40.

Puits. — Ce tunnel a été attaqué par 8 puits intermédiaires ayant ensemble 290 mètres de profondeur et 2 puits placés aux têtes. Le plus profond de ces puits a 53^{m}50. Ils ont dans œuvre 2 mètres sur 4^{m}50 et hors cadre 2^{m}70 sur 5^{m}20.

D'après les attachements qui ont été pris, les puits sont revenus en moyenne à 822 francs le mètre courant, savoir :

14 mètres cubes de déblais à 42 francs..	608 fr.
Boisage.....	182 »
Epuisements.....	32 »
TOTAL	822 fr.

Les prix payés aux tâcherons sont supérieurs à ce chiffre, car l'ensemble des puits a coûté 300,000 francs, soit 220 francs le mètre courant de tunnel, non compris les installations spéciales (manèges, etc.), qui ont coûté 100,000 francs.

L'approfondissement mensuel a varié dans chaque

puits de 3m50 à 6 mètres, suivant la dureté de la roche.

Le premier puits a été commencé en novembre 1852. Ils ont tous été finis en un an, sauf le n° 7 qui avait 48 mètres de profondeur et a exigé 13 mois de travail. Au fond de ce puits le mètre cube de déblais est revenu à 71 fr. 35.

Excavation. — Le cube par mètre courant de l'excavation du tunnel a varié de 47 à 54 mètres et était en moyenne de 51 mètres dont 16 mètres pour la galerie d'avancement et 35 mètres pour l'abattage.

Il s'est produit des éboulements qui ont causé de grandes dépenses surtout en boisages et maçonneries.

Petite Galerie. — L'avancement mensuel de la petite galerie a varié de 2m60 à 8m60 et a été en moyenne de 5m50. On faisait deux postes par 24 heures.

Le prix d'excavation du mètre cube de cette galerie a varié de 24 francs à 83 francs ; le prix moyen a été de 41 francs et s'établit comme suit :

Main-d'œuvre, 19 francs. — Transports, 3 francs. — Poudre et mèches, 5 francs. — Éclairage, 1 fr. 70. — Outils et divers, 7 francs. — Faux frais et bénéfice 3/20, soit 5 fr. 30.

Les mineurs étaient payés 4 fr. 50 par jour et la poudre coûtait 2 fr. 25 le kilog.

Le percement de la galerie a exigé 1 an de travail.

L'abattage, cubant 35 mètres au mètre courant, a

coûté 22 francs ; le prix moyen d'excavation pour l'ensemble du tunnel a donc été de 28 francs par mètre cube, soit pour 51 mètres cubes 1,428 francs par mètre courant, non compris les boisages et épuisements.

On a consommé en moyenne pour tout le tunnel 1 1/2 kilogramme de poudre par mètre cube excavé.

Maçonneries. — Les pieds-droits sont construits en moellons bruts provenant des déblais du tunnel. Le 1/4 environ de leur surface n'a pas été muraillé.

La voûte est en briques dans les parties solides et n'a que 0^m23 d'épaisseur comme à la Nerthe. Dans les mauvaises parties elle est en moellons de granit avec une épaisseur de 0^m 70 à 1 mètre. L'épaisseur moyenne pour tout le tunnel est de 0^m475.

La maçonnerie de briques était payée 50 francs et celle de moellons 35 francs le mètre cube.

L'aqueduc placé au centre du tunnel avait 0^m30 a 0^m40 de large sur 0^m50 à 0^m60 de haut. Son radier était à 0^m80 au-dessous du rail.

Prix du mètre courant de tunnel. — Le mètre courant de tunnel a coûté tout compris 2,600 francs eu égard aux prix élevés qu'on a payés aux tâcherons, surtout au début des travaux, mais en réalité il ne valait que 2,400 francs. Ce dernier prix s'établit comme suit pour les deux espèces de terrain qu'on a rencontrées :

Nos D'ORDRE	NATURE DES DÉPENSES	GRANIT DUR ET SOLIDE			GRANIT DUR MAIS SANS SOLIDITÉ		
		CUBE	PRIX du mètre cube	PRIX du m. courant	CUBE	PRIX du mètre cube	PRIX du m. courant
1	Excavation ;	mètres	francs	francs	mètres	francs	francs
	Petite galerie.	16	54	864	16	28	448
	Abattage....	31	26	806	38	16	608
2	Boisages.....	»	»	»	»	»	177
	TOTAUX...	47	35.5	1670	54	23	1233
3	Maçonnerie..	4	52.5	210	12	45.5	546
4	Eboulements.....			33			75
5	Epuisements en galerie....			53			53
6	Aqueduc			25			25
7	Creusement des puits			220			220
8	Matériel spécial, manèges..			70			70
9	Surveillance, divers.....			90			110
	TOTAL GÉNÉRAL...			2371			2332

La durée effective des travaux a été de 4 1/2 ans, mais si on n'avait attaqué le tunnel que par les deux têtes, son exécution aurait duré 11 à 12 ans ; il aurait alors coûté 585 francs de moins et ne serait ainsi revenu qu'à 1,800 francs, car on aurait économisé les dépenses suivantes :

Percement des puits.....	220 fr.
Montage des déblais par les puits, 3 francs le mètre cube...	150
A reporter.....	370 fr.

Report.....	370 fr.
Bardage par les puits des matériaux, outils, etc.....	90
Installations de manèges, etc.....	72
Epuisements dans les galeries.....	53
TOTAL.....	585 fr.

2° TUNNELS DANS LES GRANITS DU CENTRE DE LA FRANCE

1° Sur la ligne de Montluçon à Limoges, deux souterrains dans le granit et à deux voies ont été payés 21 fr. 40 et 25 francs par mètre cube pour l'excavation. L'un d'eux, de 304 mètres de long, a coûté 1,610 francs, et l'autre de 516 mètres a coûté 1,850 francs. Leur construction date de 1861-64.

2° Sur la ligne de Commentry à Gannat, construite de 1862 à 1871, six tunnels *à une voie*, mesurant ensemble 1,177 mètres de long et percés dans les micaschistes, gneiss et granit ont coûté 952 francs le mètre courant. L'excavation mesurant 34 1/2 mètres cubes par mètre courant a été payée 18 à 19 francs le mètre cube.

3° Sur la ligne d'Eymoutiers à Maymac, construite de 1882-1884, 3 souterrains *à une voie* dans le granit et ayant ensemble 1,210 mètres de long ont coûté respectivement 849 francs,—1,011 francs et 1,078 francs.

4° Sur la ligne de Limoges à Châteauroux, à Nouaillas, deux souterrains à deux voies, ayant en-

semble 166 mètres de long et percés dans un granit très dur, très compact, avec nombreux délits et sources abondantes, ont coûté 1,985 francs le mètre courant, savoir : Excavation, 1,100 francs, dont 73 francs pour boisage; maçonnerie, 520 fr.; matériel, éclairage, magasins, 230 fr.; épuisements et divers, 135 francs. L'excavation mesurant 56 mètres, a coûté par mètre cube : 24 fr. pour la galerie d'avancement, 16 francs pour l'abattage et 18 fr. 17 pour l'ensemble du tunnel (*Statistique autographiée de la direction générale des Ponts et Chaussées, 1858*).

3° TUNNEL DE LA NERTHE

Le tunnel de la Nerthe, situé près de Marseille, a une longueur de 4,638^{m}80, et une section intérieure de 59,24 mètres carrés. Il a la forme d'une ellipse et se trouve sur les trois quarts de sa longueur environ dans les divers étages du terrain jurassique et pour le reste dans le terrain tertiaire.

Il a été percé au moyen de 24 puits ayant ensemble 2,418 mètres de long et dont le plus profond a 190 mètres. Ces puits avaient intérieurement 3 mètres de diamètre. Ils ont coûté 822,000 francs, soit 340 francs le mètre courant, ce qui correspond à une dépense de 180 francs par mètre courant de tunnel. La somme de 340 francs comprend 100 francs pour boisages et muraillements.

Les puits ayant moins de 20 mètres de profondeur revenaient à 145 fr. le mètre courant. Pour les grands

puits, le prix a augmenté avec la profondeur, et est revenu en moyenne aux chiffres suivants :

De 0m à 60m	de profondeur..	220 fr.	le mèt. cour.
De 60m à 100m	—	255	—
De 100m à 140m	—	318	—
De 140m à 186m	—	384	—

La hauteur de la clef de voûte au-dessus des rails est de 7m50. La largeur du souterrain au niveau des rails est de 7m60.

Le cube des déblais a été par mètre courant de 70 mètres cubes qui ont coûté 11 francs le mètre cube, soit 770 francs le mètre courant de tunnel.

Le cube de la maçonnerie de revêtement est de 12m1/2 par mètre courant; cette maçonnerie est revenue à 68 francs le mètre cube, soit 850 francs par mètre courant de tunnel L'épaisseur des pieds-droits est égale à celle de la clef de voûte. Il y a 870 mètres de long sans voûte. Les épaisseurs de la voûte à la clef sont de 0m23 (en brique) sur 1,324 mètres de long; de 0m35 sur 413 mètres; de 0m46 sur 863 mètres; de 0m58 sur 209 mètres; de 0m70 sur 933 mètres et de 0m82 sur 27 mètres.

Pour avoir le prix total du mètre courant de tunnel, il faut ajouter aux deux sommes déjà signalées, les dépenses suivantes : 180 francs pour creuser les puits; 230 francs pour les transports des déblais et matériaux, les épuisements; 100 francs pour la fourniture du matériel des puits comprenant 14 machines à vapeur d'une force totale de 265 chevaux; enfin 126 francs pour frais généraux et surveillance. Total

général : 2,256 francs. Les travaux ont duré environ quatre ans, soit du commencement de 1844 à la fin de 1847. Ils ont été dirigés par l'ingénieur Talabot (1).

4° TUNNEL DE BLAIZY

Le tunnel de Blaizy, près de Dijon, a 1,100 mètres de long, et une pente continue de 4 m/m. A l'exception de 3 ou 400 mètres où il traverse le calcaire à gryphées du lias, il se trouve constamment dans les marnes du lias ou dans les marnes irisées avec gypse.

On a ouvert 20 puits ayant ensemble une profondeur de 2,460 mètres, le plus profond a 196 mètres. Les 12 plus profonds avaient des machines à vapeur d'une force de 20 chevaux.

On a percé en outre environ 1,000 mètres de galerie de 4 mètres carrés de section pour drainer la région supérieure du terrain dans lequel sont percés les puits les plus profonds, attendu qu'on a rencontré une grande quantité d'eau à environ 20 mètres de profondeur, immédiatement au-dessous du calcaire à entroques. — On a creusé également 200 mètres courants de galeries, qui servent à relier les puits avec le tunnel.

La clef de la voûte est à 7m50 au-dessus du rail, comme à la Nerthe. Le tunnel est voûté sur toute sa longueur, mais on a supprimé la maçonnerie des pieds-

(1) Renseignements extraits des statistiques publiées par le ministère des travaux publics. — Autographie de 1858

droits dans le calcaire à gryphées, soit sur 600 mètres de long. La voûte a en moyenne 0^m60 à 0^m70 d'épaisseur, sauf dans les parties où la marne du lias est humide, c'est-à-dire sur 150 mètres de long, où l'on a donné des épaisseurs à la clef de 0^m92 à 1^m60. On a fait un radier de 0^m50 d'épaisseur sur 750 mètres de long. Ce radier avait la forme d'une voûte tracée avec un rayon de 7^m41. Partout ailleurs, les marnes de la plate-forme n'ont été recouvertes que d'une chape en béton de 0^m10 ou 0^m15 d'épaisseur. La plate-forme était réglée avec des pentes transversales de 10 %, convergeant vers un acqueduc voûté construit en brique et ayant intérieurement 0^m60 de large sur 1^m10 de haut, et dont le radier était placé à 1^m50 au-dessous des rails.

Ce tunnel a coûté à la Compagnie 2,195 francs le mètre courant et a été exécuté à forfait ; mais il n'est revenu, à ce qu'il paraît, qu'à 1,450 francs à l'entrepreneur général. Voici le détail de cette somme : excavation, y compris les puits, 700 francs ; maçonneries, 460 francs ; bois, 95 francs ; surveillance, 50 francs ; installations diverses et frais généraux, 145 francs.

Le mètre cube de déblai, y compris les transports, est revenu à 9 fr. 50 dans les marnes aquifères du lias ; à 6 fr. 50 dans les marnes sèches et solides ; à 15 fr. 20 dans le calcaire à gryphées ; à 9 fr. 70 dans le gypse ; à 8 fr. 45 dans les marnes irisées décomposées.

Les puits ayant 3 mètres de diamètre intérieurement ont coûté 300 francs le mètre courant dans le calcaire à gryphées et 150 francs environ dans les marnes diverses.

On voit que les tunnels de la Nerthe et de Blaizy sont revenus à un prix très élevé, quoique percés dans des terrains sédimentaires, mais cela tient en grande partie à la hauteur exceptionnelle qu'on leur a donnée, au grand nombre et à la profondeur des puits qu'on a ouverts pour en hâter l'exécution, et à l'inexpérience qu'on avait encore de ce genre de travaux à l'époque où ils ont été exécutés.

Le tunnel de Blaizy a été exécuté de 1845 à 1851 ; il a été commencé par l'Etat, puis remis à la Compagnie de Paris-Lyon. Son exécution a été fort retardée par la révolution de 1848. Il a été construit sous la direction des ingénieurs Jullien, Ducos et Ruelle.

5° TUNNELS DU LIORAN

(CANTAL)

Deux tunnels ont été construits au Lioran: l'un pour le passage d'une route a été percé par l'Etat, de 1839 à 1843, sous la direction de M. Ruelle, ingénieur ordinaire ; l'autre, pour chemin de fer, a été exécuté vingt ans plus tard, de 1865 à 1868, par la Compagnie d'Orléans, sous la direction de M. Nordling, ingénieur en chef. Ces deux tunnels sont intéressants parce qu'ils ont été ouverts l'un au-dessus de l'autre, et que celui de la route a été percé par les deux têtes seulement, tandis que pour l'autre on a creusé des

puits pour en hâter l'exécution. Ces souterrains permettent donc de faire, dans une certaine mesure, la comparaison entre les dépenses résultant des deux modes d'exécution qui ont été appliqués.

Ces tunnels se trouvent dans des terrains volcaniques et des conglomérats trachytiques de composition et dureté très variables, traversés par une multitude de filons de trachyte, de basalte et de phonolite, et par des fissures de 0^m05 à 0^m15 de largeur remplies d'argiles souvent très aquifères.

Tunnel de la route (1). — Le tunnel de la route a une longueur de 1,386 mètres et une pente uniforme de 29 $^0/_{00}$; il a la forme d'une demi-ellipse ayant 6^m50 de large à la base et 6^m50 de haut. Sa section libre présente une surface de 35 mètres carrés, mais par suite des revêtements qu'il a fallu faire, le cube des déblais a été en moyenne de 46 mètres par mètre courant soit 7 mètres pour la petite galerie d'avancement et 39 mètres pour l'abattage.

Ce souterrain, commencé en août 1839, a été percé le 23 novembre 1843 soit en 4 ans 1/2 de travail continu : l'avancement a donc été en moyenne de $13^m1/2$ par mois à chaque tête. — Plusieurs éboulements se sont produits en cours d'exécution.

Voici les prix de revient pour l'excavation d'un mètre cube dans les divers terrains traversés. Les mineurs étaient payés 3 fr. 50 par jour et la poudre 2 francs le kilogramme.

(1) Voir *Annales des Ponts et Chaussées*, année 1846.

	CONGLOMÉRAT ORDINAIRE	TRACHYTE MOYENNEMENT DUR	BASALTE TRÈS DUR
PETITE GALERIE	francs	francs	francs
Main-d'œuvre	7 00	11 40	26 25
Poudre	2 00	2 75	6 15
Outils	1 15	1 85	7 60
TOTAUX	10 15	16 00	40 00
ABATTAGE			
Main-d'œuvre	2 70	4 50	5 40
Poudre	0 80	1 80	2 50
Outils	0 50	0 80	1 70
TOTAUX	4 00	7 10	9 60

Le mètre cube extrait en petite galerie a coûté en moyenne deux 1/2 fois plus que celui de l'abattage.

Le mètre courant de souterrain est revenu à 954 fr., dont voici le détail :

Excavation	Main-d'œuvre	214 »	482 fr.
	Poudre et mèches	62 »	
	Eclairage	12 »	
	Outils	27 »	
	Chargement et transport des déblais	94 »	
	Boisages. — Eboulements	73 »	
Maçonnerie, 11 mètres cubes à 38 fr			418 »
Epuisements			27 »
Aérage			5 »
Matériel. — Surveillance			22 »
		TOTAL	954 fr.

Le mètre cube de déblais, pour la section entière, a

coûté 10 fr. 50, y compris 2 fr. pour chargement et transport.

La consommation de poudre a été de 1 1/2 kilogr. par mètre cube pour la galerie d'avancement, et 0 kil. 55 par mètre cube pour l'abattage.

Le gros outillage, voies et wagons, a coûté 52,000 fr. en tout, et a été estimé valoir seulement 12.000 fr. après l'achèvement des travaux.

Les maçonneries avaient 0 m33 d'épaisseur à la clef dans les terrains solides et 0 m65 dans les éboulis ordinaires ; on a donné 1 mètre d'épaisseur sous un éboulement d'une importance exceptionnelle.

Tunnel du chemin de fer (1). — Ce tunnel a une longueur de 1,958 mètres et une pente unique de 24 ‰. En plan il est à une distance moyenne de 50 mètres du précédent et 25 mètres plus bas ; sa tête nord est à la cote 1152 mètres.

Il est construit pour une seule voie.

La voûte a 5 mètres de diamètre. Hauteur de la clef de voûte au-dessus du rail, 5m50. Largeur au niveau des rails, 4m32. Surface de la section intérieure, 26 mètres carrés. Les pieds-droits sont tracés avec une courbe de 9 mètres de rayon.

Puits. — Pour percer ce souterrain on l'a mis en communication avec celui de la route au moyen de 4 puits d'extraction espacés de 500 mètres au maximum et ayant dans œuvre 2m20 de large sur 5m50 de long,

(1) Renseignements extraits des *Comptes rendus statistiques* de la Compagnie d'Orléans.

[illegible] de 18 mètres carrés en dehors des [illegible] avait en outre 4 petits puits de 1 mètre [illegible] destinés à l'aérage et 120 mètres de [illegible] transversales. Les puits avaient en moyenne [illegible] de profondeur et le plus grand 29 mètres. [illegible] coûté fort cher, car ceux d'extraction [illegible] galeries transversales ont coûté ensemble [illegible] ceux d'aérage ont coûté 54,000 fr. L'ex- [illegible] des puits d'aérage a été payée 49 fr. le [illegible], soit 120 fr. le mètre courant, et celle des [illegible] extraction 28 fr. le mètre cube soit 500 fr. le [illegible] courant. A ces prix il faut ajouter les maçon- [illegible] boisages qu'il a fallu exécuter pour soutenir [illegible]

[illegible] leur faible profondeur et leur espacement [illegible] considérable, les puits ont grevé de 137 fr. le [illegible] revient du mètre courant du souterrain.

[illegible] mensuel maximum dans une seule [illegible] de 23m20, et l'avancement moyen de 13m20, [illegible] même que celui qu'on avait obtenu 20 ans au- [illegible] dans le tunnel de la route.

[illegible] ont duré 3 ans et 2 mois. En opérant [illegible] aux têtes seulement il aurait fallu 6 ans 1/2.

[illegible] courant de tunnel est revenu au prix de [illegible] voici le détail:

[illegible] déblai à 19 fr. = 665 f.		
maçonnerie à		988 fr.
.....	323 »	
A reporter.....		988 fr.

Report.....		988 fr.
Dépenses spéciales.		
Puits.....	137 fr.	
Machines.....	75 »	
Bâtiments des machines, hangars divers.....	17 »	
Eclairage exceptionnel du tunnel de la route.....	32 »	301 »
Prime d'accélération à l'entrepreneur.....	10 »	
Remaniement de la chaussée du tunnel.....	30 »	
Divers.....		19 »
TOTAL.....		1.308 fr.

Si l'on veut maintenant comparer les prix de revient des deux tunnels que nous venons de décrire, il faut d'abord rappeler que celui de la route a une section de 35 mètres carrés, tandis que celui du chemin de fer n'a que 26 mètres, soit 26 % de moins; mais, en échange, le premier n'a que 1,386 mètres de long, tandis que le second a 1,956 mètres, soit 40 % de plus.

Si le prix des tunnels était proportionnel à leur section, le tunnel du chemin de fer, comparé à celui de la route, n'aurait dû coûter que 710 fr. au lieu de 1,308 fr.; l'augmentation de dépenses est donc considérable.

Cette augmentation provient de deux causes : la première, c'est que le prix pour l'excavation et le transport s'est élevé de 10 fr. 50 à 19 fr. par mètre cube, et a ainsi presque doublé. Ce fait est sans doute

dû en partie à l'élévation du prix de la main-d'œuvre depuis 1840 à 1866, et à cette circonstance que le prix d'excavation augmente à mesure que la section diminue; mais il est dû aussi en grande partie à ce que le prix de 19 fr. comprend implicitement les dépenses pour aérage, épuisements et extraction par les puits.

La seconde cause d'augmentation de dépenses résulte des frais spéciaux qu'on a faits pour activer les travaux en creusant des puits; ces frais figurent au tableau ci-dessus pour une somme de 301 fr., mais ce chiffre est inférieur à la réalité, car il doit être augmenté des frais résultant du transport par les puits, des épuisements et de l'aérage compris, comme nous venons de le dire, dans le prix d'excavation. On n'exagère certainement pas en estimant ces derniers frais à 100 fr., et en portant ainsi à 400 fr. par mètre courant les dépenses totales provenant de l'accélération qu'on a voulu donner au percement du tunnel du chemin de fer.

V

TUNNELS DE L'ESPAGNE

1° TRAVERSÉE DU GUADARRAMA

Entre Madrid et Avila, le chemin de fer du Nord de Espagne traverse la chaîne du Guadarrama où il se ouve constamment dans des terrains granitiques ésentant une dureté souvent considérable. Il y a sur ce rcours 17 tunnels ayant ensemble 4,758 mètres de g; le plus long a 998 mètres. Ces tunnels sont à deux es et ont une section de 55 à 56 mètres, quoique non raillés, attendu qu'on a fait l'excavation assez grande r pouvoir faire plus tard un revêtement en maçonne de 0m50 d'épaisseur si on en reconnaissait la ssité ; ils ont généralement coûté 1,700 à 2,000 fr. exceptionnellement 2,500 fr. le mètre courant. ns l'un d'eux, celui de la Cañada, où la roche présentait une dureté exceptionnelle, la galerie d'avancement ayant 12 mètres carrés de section a coûté de 50 à 100 fr. le mètre cube et en moyenne 80 fr.; l'abattage mesurant 44 mètres carrés a coûté 30 fr. le mètre

cube, l'ensemble est ainsi revenu à 41 francs le mètre cube, soit 2,296 francs par mètre courant de tunnel.

En général, on a payé 25 francs l'excavation du mètre cube de déblai pour l'ensemble du tunnel, ce prix était augmenté de 5 francs par mètre cube pour les déblais extraits par des puits.

Les puits en petit nombre et peu profonds, ont été payés 400 et 600 francs le mètre courant.

Ces tunnels ont été construits en 1862.

2° TRAVERSÉE DES PYRÉNÉES

Les travaux de la traversée des Pyrénées ont été commencés à la fin de 1858 et terminés en 1864. (Inauguration le 15 août 1864.)

Cette traversée, comprise entre Beasain et Alsasua, a une longueur de 45 kilomètres. Elle se trouve dans le terrain crétacé, composé essentiellement de calcaires et de grès souvent très aquifères et recouverts en partie par des alluvions de nature argileuse, qui ont causé des éboulements considérables dans toutes les tranchées et remblais du chemin de fer et ont ainsi donné lieu à de grandes difficultés de construction.

La pente maximum du chemin de fer est de 15 °/₀₀.

Le col de la chaîne des Pyrénées est ici à la cote [illegible] mètres ; le chemin de fer le traverse à la cote [illegible], au moyen d'un tunnel de 1,158 mètres de long. Un autre tunnel, beaucoup plus long, celui de

Oazurza, a 2,955 mètres et traverse un contrefort de la montagne.

Il y a en tout 23 tunnels, ayant ensemble une longueur de 10,504 mètres. Ces tunnels n'offrent rien d'intéressant au point de vue de la traversée des Alpes, qui nous occupe spécialement, sauf celui d'Oazurza qui, par sa longueur et les difficultés qu'il a présentées en cours d'exécution, est de nature à corroborer les conclusions que nous devons tirer de l'étude des grands tunnels pour en fixer le prix d'établissement.

Tous les tunnels sont à double voie, ils ont 8 mètres de large et 6 mètres de haut, au-dessus du rail à la clef de voûte; ils présentent un vide intérieur de 46 mètres carrés.

Petits tunnels. — La construction des petits souterrains n'a généralement présenté aucune difficulté. Ils coûtaient environ 1,300 francs le mètre courant avec muraillement de 0m60 d'épaisseur. Ce prix s'établit comme suit :

56 mètres cubes de déblais, à 13 fr. 50....	756 fr.
10m80 de maçonnerie, à 45 fr.....	486 »
Aqueduc et têtes.....	34 »
TOTAL.....	1.276 fr.

Lorsque l'épaisseur des maçonneries n'était que de 0m40, ce qui était le cas le plus habituel, le tunnel ne coûtait plus que 1,100 fr. le mètre courant.

Le prix moyen de 13 fr. 50 pour excavation s'éta-

blit comme suit, pour une section de 52m40, correspondant au revêtement de 0m40 d'épaisseur, savoir :

Galerie d'avancement de 12 mètres carrés de section, 20 fr. le mètre cube. — Abattage, 9 fr. par mètre cube, pour une section de 40m40. — Boisage, 2 fr. par mètre cube.

Tunnel de Oazurza.— Le tunnel de Oazurza qui, comme nous l'avons dit, avait 2,055 mètres de long, se trouve tout entier dans le rocher et en grande partie dans un calcaire très dur. Il a été percé au moyen de dix puits, ayant ensemble une profondeur de 1,220 mètres et dont le plus profond avait 241 mètres. Ces puits avaient, les uns, 3 mètres de diamètre et les autres, 2m15 de large intérieurement, sur 3m90 de long; ils ont été payés 450 francs le mètre courant, pour les 800 premiers mètres, et 1,050 francs pour les 420 mètres les plus profonds, soit, en moyenne, 643 francs le mètre courant. Le prix de 1,050 francs était exagéré, car l'entrepreneur gagnait 300 francs, soit : 30 %.

Plusieurs des puits ont présenté de grandes difficultés d'exécution à cause des sources qu'on y a rencontrées, et qui fournissaient souvent 2 à 3 mètres cubes d'eau par heure.

Le mètre cube d'excavation des puits revenait, non compris les dépenses d'épuisement, à 60 fr., comprenant : main-d'œuvre, 23 fr. — Poudre, 1k30, 4 fr. — Outils, éclairage, 4 fr. — Bois, 14 fr. — Montage des déblais, 15 fr.

Le prix de revient du tunnel Oazurza peut être

estimé à 2,500 fr. le mètre courant, conformément aux détails suivants :

Excavation, 54 mètres cubes à 22 fr.....	1.188 fr.
Maçonnerie, 9 mètres cubes à 60 fr.....	540 »
Aqueduc et têtes.....	60 »
Dépenses pour puits.....	260 »
Installations diverses et matériel spécial..	200 »
Epuisements.....	100 »
Divers.....	152 »
TOTAL.....	2.500 fr.

La différence entre le prix ci-dessus de 22 fr. par mètre cube d'excavation, et celui de 13 fr. 50, relatif aux petits tunnels, s'explique par la grande dureté qu'a présentée la roche à Oazurza, par les frais de transport au moyen de puits, soit 4 à 5 francs par mètre cube, et enfin par l'abondance des eaux qui ont gêné le travail.

La somme de 200 fr., correspondant aux installations, se décompose comme suit : Chemins d'accès, 33 fr. — Bâtiments pour loger le personnel et les ouvriers, hôpitaux, 35 fr. — Hangars, magasins divers, 32 fr. — Manèges, machines à vapeur, pompes et leurs accessoires, 100 fr.

Les travaux des Pyrénées ont été relativement coûteux, parce que le pays était sans ressources et peu habité. On devait faire venir de France, à grands frais, tout l'outillage ainsi que les bois et la houille. Les bois provenaient du département des Landes et coûtaient, rendus sur les chantiers, 80 fr. le mètre cube en grume; la houille coûtait 70 fr. la tonne.

VI

DESCRIPTION SOMMAIRE

DES

TUNNELS DE SECOND ORDRE

ET A DEUX VOIES

CONSTRUITS EN FRANCE

Les chapitres qui précèdent contiennent la description des grands tunnels construits dans les Alpes, dans le Jura et en France. Il m'a paru utile de compléter ces documents en résumant dans les tableaux suivants les renseignements que j'ai pu recueillir sur les tunnels de second ordre construits pour deux voies.

Ces tableaux donnent la longueur et le prix de revient des tunnels ainsi que la nature des terrains dans lesquels ils sont percés. Les tunnels ont été groupés suivant la nature des terrains qu'ils traversent afin de faire ressortir, si possible, l'influence que la nature du sol exerce sur leurs prix de revient.

Les tunnels mentionnés dans ces tableaux sont au nombre de 379 dont 240 construits en France et 139 construits à l'étranger.

Les renseignements relatifs à la France sont empruntés surtout aux publications faites par le ministère des travaux publics, savoir :

1° *Statistique des tunnels de chemin de fer*, cahiers autographiés, années 1856 et 1858 ;

2° *Conditions techniques d'établissement des chemins de fer à la fin de 1862*, volume in-4° imprimé en 1865.

	TUNNELS					
	NOMS	Date d'exécution	Nombre	Longueur totale	Prix du mètre courant	Profondeur totale des puits
				m.	fr.	m.
TERRAINS ANCIENS. — GRANITS						
	La Souterraine..	1847-54	1	702	2.091	57
	St-Sulpice-Laurieres.....	1847-54	1	234	2.139	4..
	.... Id.	1847-55	1	795	2.045	20
	Arbazac Nouaillas.....	1847-55	1	166	1.966	....
	Le Cellier (Clermont.....	1845-49	1	100	1.279	....
	Limoges.....	1859-61	1	1024	1.187	....
	.....	1855-58	12	1987	1.150 à 1.800	....
	.....	1855-58	1	338	3.122	....
	.....	1855-58	2	360	1.360	....
	.....	1855-58	3	266	1.410	....

ATURE DU TERRAIN	OBSERVATIONS
TERRAINS ANCIENS. — GRANITS	
nit.....	3 puits : profondeur maximum, 21 mètres. Roche en partie très dure et en partie décomposée, exigeant beaucoup de boisages. Par mètre courant : déblais, 58 mètres cubes à 22 fr. 50 = 1305 francs; boisages, 68 francs ; maçonnerie, 390 francs ; divers, 338 francs. La galerie d'avancement a coûté 10 à 45 francs le mètre cube et l'abattage 6 à 30 francs. Durée des travaux, 7 ans 2 mois.
nit dur.....	Fissures dans la roche. Beaucoup d'eau. Par mètre courant : déblais, 53 mètres cubes à 26 francs = 1378 francs ; boisages, 52 francs ; maçonnerie, 380 francs ; divers, 329 francs. La petite galerie a coûté 32 francs le mètre cube et l'abattage 18 francs. Durée des travaux, 7 ans 2 mois.
nit.....	1 puits. Roche délitée exigeant beaucoup de boisages, beaucoup d'eau. Eboulement important sur 20 mètres de longueur. Par mètre courant : déblais, 55 mètres cubes à 15 fr. 50 = 852 francs ; boisages, 100 francs ; maçonnerie, 416 francs ; divers, 677 francs. Prix de la petite galerie, 25 francs le mètre cube ; abattage, 12 fr. Durée des travaux, 7 ans 6 mois.
nit dur.....	Nombreux délits. Beaucoup d'eau. Par mètre courant : déblais, 56 mètres cubes à 18 francs = 1008 francs ; boisages, 73 francs ; maçonnerie, 521 francs ; matériel, éclairage, chemins, 230 francs ; épuisements et divers, 134 francs. Déblais de petite galerie, 24 francs le mètre cube ; abattage, 16 francs.
eiss très dur.....	Murailement complet. Avancement de 3m50 seulement par mois, à chaque tête, en travaillant jour et nuit. Par mètre courant : déblais, 55m 1/2 à 10 francs = 555 fr. ; maçonnerie, 25 mètres cubes à 27 francs = 675 francs. Divers, 49 francs. Durée de l'exécution, 4 ans.
ches granitiques.....	
eiss quartzeux.....	
eiss quartzeux.....	Roche très dure. Le prix est excessif et paraît erroné eu égard aux prix des tunnels voisins qui sont dans des roches analogues.
pentine verte.....	
nit et porphyre.....	

N° d'ordre	LIGNES DE CHEMINS DE FER	TUNNELS — NOMS	Date d'exécution	Nombre	Longueur totale	Prix du mètre courant	Profondeur totale des puits	Épaisseur moyenne des...
					m.	fr.	m.	
11	Montauban au Lot.	Asprières.....	1855-58	1	229	1.561	.. ..	
12	Id.....	Lévignac-le-Haut	1855-58	1	193	1.619	....	
13	Lyon a Tarascon...	Serves.....	1851-55	1	396	1.338	26	
14	Nevers a Roanne..	St-Martin-d'Estréaux.....	1852-57	1	1380	2.600	360	
15	Id.....	La Pacaudière...	1850-57	1	227	1.720	....	
16	Roanne a Lyon.....	Divers.....	1855-57	6	2587	676 à 1.193	519	
17	Saint-Germain-des-Fossés a Brioude.	Auzat.....	1854-56	1	42	1.008	....	
18	Clermont-Tulle ...	Divers.....	1874-78	11	1753	1.530	....	
19	Eygurandes a Bort.	Divers.....	1878-79	7	1287	1.530	....	
20	Montluçon a Limoges	Divers.....	1861-64	2	820	1.600 à 1.850	....	
	TERRAINS DE SCHISTES. — GRÈS							
21	Paris a Strasbourg.	Arschwiller.....	1842-50	1	2678	965	....	
22	Id.....	Hoffmühl.....	1846-50	1	247	1.148	....	
23	Id	Lutzelbourg	1846-50	1	430	900	....	
24	Id	Près Saverne....	1846-50	3	1197	707 à 831	....	

TURE DU TERRAIN	OBSERVATIONS
t.....	
chiste.....	Filons de quartz.
t et schiste.....	
t-Porphyre.....	10 puits : profondeur 54 mètres. (Voir page 144.)
Id.	
s granitiques.....	15 puits : profondeur maximum, 55 mètres.
s.....	
les et granites.....	Le percement de la petite galerie a duré 3 à 14 mois et en moyenne 6 mois par tunnel. L'avancement à chaque tête a donc été en moyenne de 14 mètres par mois. Le prix de 1530 francs est un prix moyen à forfait applicable aux 18 tunnels.
es argileux ou micacès, t granites.....	
t.....	(Voir page 149.)

TERRAINS DE SCHISTES. — GRÈS

bigarré dur.....	Entièrement voûté. Construction facilitée par le voisinage du souterrain du canal qui a servi à extraire les déblais au moyen de galeries transversales. Par mètre courant : déblais, 46 mètres cubes à 8 francs = 368 francs ; maçonnerie, 12 mètres cubes à 23 francs = 276 francs ; boisages, 9 francs ; puits et galeries transversales, 29 francs ; épuisements, 14 fr. 50 ; matériel, 110 francs ; éclairage, 36 francs ; surveillance, 58 francs ; divers, 24 francs.
des Vosges.....	Entièrement voûté. Plusieurs éboulements et écrasements de voûte. Par mètre courant : déblais, 60 mètres cubes à 9 francs = 540 francs ; maçonnerie, 18 mètres cubes à 20 francs = 360 francs ; boisages, 30 francs ; matériel, 22 francs ; chape et blocage, 55 francs ; divers, 141 francs.
des Vosges.....	Entièrement voûté. Par mètre courant : déblais 55 mètres cubes à 8 francs = 440 francs ; maçonnerie, 14 mètres cubes à 21 francs = 294 francs ; boisages, 8 francs ; chape, 28 francs ; égout, 8 francs ; blacage, 6 francs ; divers, 116.
des Vosges.....	17 à 22 mètres cubes de maçonnerie par mètre courant, payés 14 à 18 francs le mètre cube ; 40 à 46 mètres cubes de déblais payés 8 fr. 50 le mètre.

N.os d'ordre	LIGNES DE CHEMINS DE FER	TUNNELS — NOMS	Date d'exécution	Nombre	Longueur totale	Prix du mètre courant	Profondeur totale des puits	Observations
					m.	fr.	m.	
25	PARIS A MULHOUSE..	Champagney....	1854-58	1	1250	1.533	280	
26	CHARLEVILLE A GIVET	Divers	1858-61	5	2770	1.285 à 1.417	....	
27	Id.....	Givet.....	1860-61	1	510	1.598	....	
28	RENNES A REDON....	Saint-Senoux ...	1857-62	1	177	1.507	....	
29	Id.....	Laugon	1860-62	1	635	1.500	127	
30	NANTES A BREST.....	Divers.....	1860-64	6	1353	1.659	....	
31	MONTLUÇON A MOULINS.....	Noyant.....	1858-59	1	162	1500	....	
32	LIMOGES A PÉRIGUEUX	Thiviers.....	1859-61	1	328	1.256	....	
33	BRIVES A CAPDENAC.	Cosnac.....	1857-62	1	2385	1.206	345	
34	MONTAUBAN AU LOT.	Saint-Antonin...	1855-58	1	215	1.575	....	
35	ROANNE A LYON.....	Divers.....	1855-57	12	3377	980 à 1.930	292	
36	BESSÈGES A ALAIS...	Saint-Ambroix ...	1855-56	2	303	770	....	
	TERRAINS DU TRIAS. — MARNES IRISÉES							
37	PARIS A MULHOUSE..	Torchenay.....	1855-57	1	1113	1.440	141	
38	Id.....	Port-sur-Saône..	1855-57	1	388	1.531	....	
39	Id.....	Genevreuille	1855-58	1	621	1.500	122	
	TERRAINS JURASSIQUES							
40	PARIS A STRASBOURG.	Pagny-sur-Meuse	1849-51	1	572	1.285	....	

...AIN	OBSERVATIONS
.....	8 puits : profondeur maximum, 36 mètres.
.....	
.....	
...rizeux.....	
.....	3 puits : profondeur maximum, 50 mètres.
.....	L'un des tunnels, celui de Quimper, est dans un terrain houiller très dangereux pour les éboulements. Le prix des six souterrains a varié de 1271 à 2230 francs.
...grès et schistes.	Terrains disloqués produisant des poussées considérables.
.....	
.....	6 puits : profondeur maximum, 95 mètres ; bancs quarzeux très durs et remplis d'eau.
.....	
.....	11 puits : profondeur maximum, 58 mètres.
...s très durs.....	

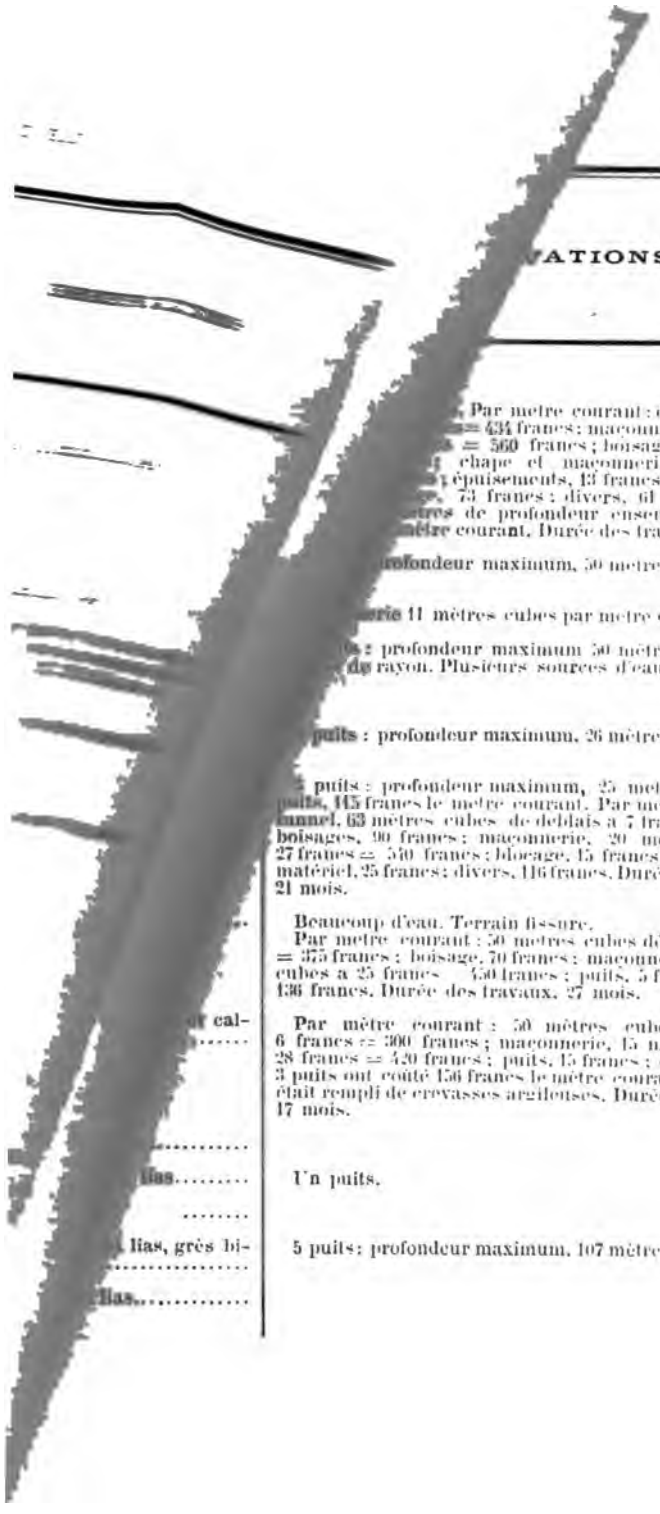
TERRAINS DU TRIAS. — MARNES IRISÉES

.....	5 puits : profondeur maximum, 47 francs.
.....	Radier partiel rayon 10 mètres ; maçonnerie, 24 mètres cubes par mètre courant.
.....	

TERRAINS JURASSIQUES

...s de l'Oxford-clay.....	Eaux abondantes. Par mètre courant : déblais, 64 mètres cubes à 8 francs= 512 francs ; maçonnerie, 22 mètres cubes a 30 francs= 660 francs : boisages, 50 francs ; blocages, 55 francs ; divers, 18 francs. Durée des travaux, 33 mois.

N° d'ordre	LIGNES DE CHEMINS DE FER	TUNNELS — NOMS	Date d'exécution	Nombre	Longueur totale	Prix du mètre courant	Profondeur totale des puits	Épaisseur
					m.	fr.	m.	m
41	PARIS A STRASBOURG	Foug.....	1847-50	1	1122	1.395	67	
42	PARIS A MULHOUSE..	St-Vallier-et-Culmont.....	1855-58	1	1320	2.578	210	
43	BLESME A GRAY.....	Villiers-s.-Marne	1853-54	1	262	1.542	....	
44	CHARLEVILLE A PIERREPONT.....	Montmédy.....	1859-62	1	817	2.325	93	
45	Id.....	Divers.....	1860-62	3	1293	1.012 à 1.210	....	
46	VIERZON A LIMOGES..	Chasseneuil.....	1847-53	1	1002	1.056	69	
47	TOURS A BORDEAUX..	Poitiers.....	1850-52	1	320	1.297	70	
48	Id.....	Vivonne (Bâchées)	1851-52	1	425	1.036	....	
49	Id.....	Lafage.....	1852-55	1	510	902	50	
50	BRIVES A CAPDENAC..	Brives.....	1860-62	1	334	710	....	
51	Id.....	Cambes.....	1860-62	1	749	810	50	
52	Id.....	Camboulit.....	1860-62	1	417	762	291	
53	Id.....	Figeac.....	1857-62	1	1291	1.254	....	
54	Id.....	Capdenac.....	1860-62	1	280	1.082	....	



VATIONS

Par mètre courant : déblais, 62 mè… = 434 francs ; maçonnerie, 20 mètres … = 560 francs ; boisages, 53 francs ; … chape et maçonnerie de pierres … épuisements, 13 francs ; matériel, 104 … 73 francs ; divers, 61 francs. Deux …tres de profondeur ensemble ont coûté …ètre courant. Durée des travaux, 37 mois.

…rofondeur maximum, 50 mètres.

…rie 11 mètres cubes par mètre courant.

… : profondeur maximum 50 mètres. Radier 10 … de rayon. Plusieurs sources d'eau.

… puits : profondeur maximum, 26 mètres

… puits : profondeur maximum, 25 mètres ; prix des puits, 145 francs le mètre courant. Par mètre courant de tunnel, 63 mètres cubes de déblais à 7 francs = 441 fr. ; boisages, 90 francs ; maçonnerie, 20 mètres cubes à 27 francs = 540 francs ; blocage, 15 francs ; puits, 70 fr. ; matériel, 25 francs ; divers, 116 francs. Durée des travaux, 21 mois.

Beaucoup d'eau. Terrain fissuré.
Par mètre courant : 50 mètres cubes déblais à 7 fr. 50 = 375 francs ; boisage, 70 francs ; maçonnerie, 18 mètres cubes à 25 francs = 450 francs ; puits, 5 francs ; divers, 136 francs. Durée des travaux, 27 mois.

… cal-
…

Par mètre courant : 50 mètres cubes déblais à 6 francs = 300 francs ; maçonnerie, 15 mètres cubes à 28 francs = 420 francs ; puits, 15 francs ; divers, 167 fr. ; 3 puits ont coûté 156 francs le mètre courant. Le terrain était rempli de crevasses argileuses. Durée des travaux, 17 mois.

…
…lias…
…
… lias, grès bi-
…
…lias…

Un puits.

5 puits ; profondeur maximum, 107 mètres.

N.os d'ordre	LIGNES DE CHEMINS DE FER	TUNNELS — NOMS	Date d'exécution	Nombre	Longueur totale	Prix du mètre courant	Profondeur totale des puits
					m.	fr.	m.
55	Brives a Capdenac.	Capdenac.....	1859-62	1	553	819	....
56	Montauban au Lot.	Divers.....	1855-58	4	717	845 à 1.150	....
57	Paris a Lyon.....	Lézinnes.....	1848-51	1	532	1.198	22
58	Id.....	Lézinnes et Pacy	1848-51	1	1001	1.200	138
59	Id.....	Blaizy-Bas.....	1845-51	1	4100	1.920	2097
60	Id.....	Divers	1847-49	7	834	1.291 à 1.406	....
61	Id.....	Chagny 1er.....	1844-45	1	74	1.218	....
62	Id.....	Chagny 2e.....	1844-45	1	79	1.218	....
63	Dijon a Belfort....	Divers.....	1854-58	16	6533	578 à 1.100 moy., 850	364
64	Mouchard aux Verrières.....	Divers	1859-62	9	1675	1.000	50
65	Lyon a Tarascon...	Divers (Vienne).	1854-55	3	1186	1.366 à 1.986	....
66	Tarascon a Marseille.....	La Nerthe.....	1844-47	1	4639	2.263	2308
67	Nevers a Roanne...	Saint-Pierre-le-Moutier.....	1851-52	1	650	1.304	16
68	Lyon a Genève.....	Bognes.....	1855-58	1	517	1.252	29
69	Id.....	Genisiat.....	1855-58	1	895	1.665	97
70	Id.....	Paradis	1855-58	1	1057	1.207	11
71	Id.....	Folie	1855-57	1	159	922	....
72	Id.....	Pugien	1855-57	1	658	1.305	83

TURE DU TERRAIN	OBSERVATIONS
ire du lias.....	
ire jurassique	
ire.....	Un puits.
ire corallien.....	4 puits : profondeur maximum, 38 mètres.
et marnes irisées.....	15 puits : profondeur maximum, 196 mètres. (Voir p. 152.)
ire jurassique.....	
de oolithe.....	
id.	
in jurassique.....	
ires à entroques.....	
schisteux.....	
calcaire.....	24 puits : profondeur maximum, 185 mètres. (Voir page 150.)
e du lias.....	Par mètre courant : déblais, 120 mètres cubes à 2 fr. 50 = 300 francs ; boisage, 72 francs ; maçonnerie, 31 mètres cubes à 23 francs = 713 francs ; puits, 12 fr. 50 ; épuisements, 42 francs ; matériel, 102 francs ; divers, 62 fr. 50. Exécuté à ciel ouvert sur 400 mètres de long.
ire jurassique et poudingue..	
e et argile.....	4 puits : profondeur maximum, 50 mètres. Eau assez abondante.
sique et gravier.....	Terrain sec.
ire corallien.....	
ire jurassique dur, 2e étage...	2 puits : profondeur maximum, 50 mèt. ; beaucoup d'eau.

N° d'ordre	LIGNES DE CHEMINS DE FER	TUNNELS — NOMS	Date d'exécution	Nombre	Longueur totale	Prix du mètre courant	Profondeur totale des puits
					m.	fr.	m.
		TERRAINS CRAYEUX					
73	Epernay a Reims...	Rilly.....	1850-53	1	3450	735	628
74	Paris a Rouen.....	Divers.....	1841-43	4	5276	1.140 à 1.153	530
75	Rouen au Havre...	Id.....	1844-45	8	6644	1.000 à 1.200	194
76	Malaunay a Dieppe.	Dieppe	.....	1	1650	995	168
77	Mantes a Cherbourg	Martainville et Evreux.....	1853-55	2	473	740 à 752	....
78	Id.....	Bernay.....	1854-55	1	338	765	....
79	Id.....	St-Pierre-des-Ifs. (Lamotte)	1853-55	1	2528	997	420
80	Id.....	Conches.....	1854-55	1	253	1.118	30
81	Pont-l'Evêque a Honfleur.....	Saint-Benoist....	1860-62	1	2900	955	338
82	Tours a Bordeaux..	Angoulême.....	1845-48	1	779	981	....

URE DU TERRAIN	OBSERVATIONS
TERRAINS CRAYEUX	
compacte.....	9 puits : profondeur maximum, 112 mètres. Par mètre courant de tunnel : déblais, 54 mètres cubes à 2 fr. 30 = 124 fr. ; boisage, 40 fr. ; maçonnerie, 11 mètres cubes à 27 fr. = 297 fr. ; matériel, 43 fr. ; chemins de service, 35 fr. ; puits, 117 fr. ; divers, 79 fr. Durée des travaux, 40 mois. Prix des puits, 600 fr. le mètre courant. L'extraction par les puits a coûté 1 fr. par mètre cube.
.....	
glauconnieuse.....	Largeur aux naissances 7m62. Revêtements en briques. La longueur des tunnels varie de 80 mètres a 2201 mètres ; cinq puits en tout (?)
.....	3 puits : profondeur maximum, 68 mètres.
.....	Par mètre courant 53 mètres cubes à 4 francs = 212 fr. ; boisage, 52 francs ; maçonnerie de briques, 18 1/2 mètres cubes à 50 francs = 425 francs ; éclairage, 15 fr. ; divers, 41 francs. Durée des travaux, 14 mois.
et argile.....	Par mètre courant : déblais, 54 mètres cubes à 3 fr. 25 = 175 francs ; boisage, 45 francs ; maçonnerie de briques, 10 1/2 mètres cubes a 50 francs = 525 francs ; divers, 20 francs. Durée des travaux, 9 mois.
compacte, dure. Eau.....	12 puits : profondeur maximum, 58 mètres ; 3 mètres de diamètre intérieur. Ils ont coûté 275 francs le mètre courant. 618 mètres courant du tunnel sont sans revêtement. Prix par mètre courant : déblais, 58 mètres cubes a 8 francs = 464 francs ; boisage, 25 francs ; maçonnerie, 5 mètres cubes a 56 francs = 280 francs ; puits, 45 francs ; épuisements, 117 francs ; matériel, 20 francs ; éclairage, 35 francs. Le matériel spécial, manège et machine à vapeur, a coûté 150,000 francs.
Sable. Eau.....	Prix du mètre courant : déblais, 59 mètres cubes à 3 fr. 75 = 221 francs ; boisages, 69 francs ; maçonnerie en briques, 13 mètres cubes à 54 francs = 702 francs ; puits, 10 francs : éclairage, 16 francs ; divers (terrains), 110 francs.
.....	10 puits : profondeur maximum, 44 mètres.
es dures. Grès vert.....	Eaux abondantes. Par mètre courant : 57 mètres cubes déblais a 5 fr. 50 = 313 francs ; boisages, 74 fr. ; Maçonnerie, 14 mètres cubes a 31 francs = 434 francs ; divers 160 francs. Durée des travaux, 33 mois. La petite galerie a coûté 9 à 10 francs le mètre cube.

LIGNES	TUNNELS					Profondeur totale des puits
	NOMS	Date d'exécution	Nombre	Longueur totale	Prix du mètre courant	
				m.	fr.	m.
[illegible]	Charmant.....	1845-49	1	1464	1.107	128
[illegible]	Thiviers.....	1857-61	1	390	1.108	....
[illegible]	Beaucaire.....	1837-39	1	300	449	....
[illegible]	Divers.....	1838-40	4	830	633 à 998	126
[illegible]	Aubagne.....	1856-59	1	400	1.518	....
[illegible]	Cassis.....	1856-59	1	2625	1.033	1313
[illegible]	Id.....	1856-59	1	154	902	....
[illegible]	Id.....	1856-59	1	1628	1.240	478
[illegible]	Robiac.....	1856-..	1	68	882	....
[illegible]	St-Ambroix.....	1856-57	1	126	1.071	....
[illegible] TERTIAIRE PARISIEN. — PLATRE, ARGILE, S[illegible]						
[illegible]	Amiens.....	1847-48	3	580	1.000	....
[illegible]	Condette.....	1847-48	1	184	1.748	32
[illegible]	Lonspont.....	1862	1	107	1.400	....
[illegible]	Vierzy.....	1860-62	1	1400	1.261	363
[illegible]	Chalifert.....	1847-48	1	168	2.420	....

ITURE DU TERRAIN	OBSERVATIONS
supérieure.....	2 puits : profondeur maximum, 65 mètres. Eaux abondantes. Par mètre courant : 53 mètres cubes de déblais a 16 fr. 75 = 358 francs ; boisages, 42 francs ; maçonnerie, 465 francs ; puits, 64 francs ; divers, 178 fr Les puits ont coûté 300 francs le mètre courant y compris 100 francs de muraillement, ils avaient dans œuvre 4 mètres sur 2 mètres. Les travaux ont duré 4 ans 5 mois. La galerie d'avancement ayant 10 mètres carrés de section a coûté 12 fr. 50 le mètre cube. L'abattage a coûté 5 fr. 60.
ire magnésien et argile.....	
ire néocomien.....	
Id.	
rgileux néocomien.....	
e compacte néocomienne.....	9 puits : profondeur maximum, 174 mètres.
Id.	
Id.	
ire dur et solide.....	
ire dur, mobile.....	

AIN TERTIAIRE PARISIEN. — PLATRE, ARGILE, SABLE

.....	
.....	
, glaise.....	Radier de 0m90 d'épaisseur. Eaux.
et calcaire lacustre.....	Eaux. 9 puits : profondeur maximum, 45m50 ; ils avaient dans œuvre 2m30 sur 4m50. Par mètre courant : déblais, 292 francs ; boisages, 200 francs ; maçonnerie, 710 francs ; divers, 59 francs.
es aquifères, sables, bancs es.....	Par mètre courant : déblais, 240 francs ; boisages, 777 francs ; maçonnerie, 25 mètres cubes à 40 francs = 1000 francs ; blocage derrière les maçonneries, 150 francs ; divers, 253 francs. Durée des travaux, 18 mois.

N° d'ordre	LIGNES DE CHEMINS DE FER	TUNNELS — NOMS	Date d'exécution	Nombre	Longueur totale	Prix du mètre courant	Profondeur totale des puits	Épaisseur
					m.	fr.	m.	
98	PARIS A STRASBOURG.	Armentières	1845-48	1	656	1.608	37	
99	Id.....	Méry-Nanteuil-.	1845-48	1	944	1.648	....	
100	Id.....	Chézy.....	1846-48	1	453	2.285	....	
101	PARIS A SAINT-MAUR.	Paris.....	1856-57	1	162	2.056	....	
102	Id.....	Saint-Mandé	1856-58	1	252	1.112	....	
103	Id.....	Vincennes.....	1855-56	1	375	1.542	....	
104	PARIS A MULHOUSE..	Saint-Loup-de-Naud.....	1856-57	1	105	2.078	....	
105	Id.....	Poulangy et Marnay.....	1855-57	1	200	2.089	....	
106	Id.....	Marnay	1855-57	1	200	3.089	....	
107	REIMS A CHARLEVILLE	Mézières.....	1857-58	1	142	2.380	....	
108	PARIS A SAINT-GERMAIN.....	Place de l'Europe.....	1836	1	164	1.462	....	
109	PARIS A VERSAILLES.	Puteaux.....	1838	1	71	1.500	....	
110	Id.....	Saint-Cloud	1838	1	504	2.180	273	

ATURE DU TERRAIN	OBSERVATIONS
se, marne sablonneuse et calcaires.....	Par mètre courant : 81 mètres cubes déblais à 4 francs = 324 francs ; 29 mètres cubes de maçonnerie à 30 francs = 870 ; boisages, 230 francs ; épuisements, 8 francs ; matériel, 31 francs ; dépenses diverses, 145 francs.
ses compactes et calcaires	Une source abondante ; un éboulement. Par mètre courant : 77 mètres cubes déblais à 3 fr. 80 = 293 francs ; maçonnerie, 29 mètres cubes à 28 francs = 812 francs ; boisages, 221 francs ; éboulements, 46 francs ; épuisements, 32 francs ; matériel, 125 francs ; divers, 119 fr.
e fin et argile plastique.....	Beaucoup d'eau. Par mètre courant : déblais, 89 mètres cubes à 2 fr. 65 = 236 francs ; maçonnerie, 40 mètres cubes à 29 francs = 1160 francs ; boisages, 650 francs ; divers, 239 francs. Les pieds-droits avaient 2 mètres d'épaisseur au niveau de la plate-forme. La voûte avait 1m10 à la clef et 1m80 d'épaisseur aux naissances. Ce tunnel n'a que 7m40 de largeur entre les pieds-droits. Ceux-ci ont été construits au moyen de galeries spéciales et avant la voûte.
.....	23 mètres cubes de maçonnerie par mètre courant.
.....	24 id. id. id.
.....	32 id. id. id.
.....	Radier, rayon 16 mètres ; traversée des fortifications.
ie et pierraille.....	Par mètre courant : 140 mètres cubes de déblais à 1 fr. 70 = 238 francs ; maçonnerie, 30 mètres cubes à 33 francs = 990 francs ; divers, 234 francs. Construit en 9 mois.
.....	
nes vertes et gypses.....	Le tunnel de Saint-Cloud a 504 mètres de longueur. Il a coûté 2180 francs par mètre courant, savoir : déblais, 423 francs ; boisage du tunnel, 189 francs ; maçonnerie, 24 mètres cubes à 40 francs = 960 francs ; puits et galerie, 308 francs dont 262 francs pour boisage ; épuisements, 80 francs ; divers, 220 francs. L'épaisseur de la voûte varie de 0m90 à 1m60. Les voutes réduites à 0m60 d'épaisseur s'écrasaient. On a ouvert 10 puits espacés de 50 mètres, profondeur maximum 35 mètres, ces puits avaient dans œuvre 1m80 sur 2m70. Dix galeries transversales de 10 mètres de longueur chacune. Durée des travaux, 15 mois.

N° d'ordre	LIGNES DE CHEMINS DE FER	TUNNELS — NOMS	Date d'exécution	Nombre	Longueur totale	Prix du mètre courant	Profondeur totale des puits	Épaisseur
					m.	fr.	m.	
111	MANTES A CHERBOURG	Bréval ou Boissy.	1853-56	1	796	2.867	259	
112	ORLÉANS AU BEC D'ALLIER.....	Tendron et Ignol Boubard	1848-50	1	585	2.157	101	
113	TOURS A BORDEAUX.	Lormont.....	1846-49	1	1180	1.590	....	
114	LYON A TARASCON...	Saint-Vallier....	1854-55	1	190	805	....	
115	TARASCON A MARSEILLE.....	Marseille.....	1846-47	1	476	1.858	86.40	
116	MARSEILLE A TOULON	Marseille.....	1856-58	1	210	1.809	....	
117	Id.....	Saint-Cyr	1856-59	1	357	1.680	104.50	40
118	NEVERS A ROANNE..	La Gimouille (Sampanges)..	1847-50	1	358	1.570	25	
119	LYON A GENÈVE.....	Surjoux	1857-58	1	152	2.810	11	80
120	Id.....	Le Crédo.....	1854-58	1	3949	1.640	914	50
121	Id.....	Collonges	1856-57	1	45	2.525	....	
122	ST-RAMBERT A GRENOBLE.....	Réaumont.....	1854-56	1	80	1.200	....	
123	Id.....	Criel.....	1855-57	1	580	1.200	62.50	

ATURE DU TERRAIN	OBSERVATIONS
e, glaise, eau.....	10 puits : profondeur maximum, 30m60, ont coûté 410 fr. le mètre courant ; ils avaient dans œuvre 4 mètres sur 4 mètres. Par mètre courant de tunnel : déblais, 70 mètres cubes à 18 francs = 1260 francs ; boisage, 76 francs ; maçonnerie, 20 mètres cubes à 60 francs = 1200 francs ; puits, 105 francs ; matériel (manèges, machines à vapeur), 50 fr. ; épuisements, 108 francs ; éclairage, 50 fr. ; divers, 18 fr. Durée des travaux, 2 ans 9 mois.
le et calcaire.....	4 puits : profondeur maximum, 30 mètres. Ils ont coûté 600 francs le mètre courant. Eaux très abondantes. Par mètre courant : déblais, 65 mètres cubes à 7 fr. = 455 fr. ; boisage, 102 francs ; maçonnerie, 30 mètres cubes à 37 francs = 1110 francs ; puits, 102 francs ; épuisements, 51 francs ; matériel, 51 francs ; divers 286 francs.
ılis et argiles compactes.....	La longueur de 1180 mètres comprend 5 petits souterrains successifs. Ces souterrains, placés à flanc de coteau, ont présenté des difficultés d'exécution à cause de la nature mobile du terrain, des sources rencontrées et de la profondeur à donner aux fondations dans des éboulis et terrains de remplissage. Par mètre courant on a dépensé : 65 mètres cubes déblais à 5 fr. = 325 fr. ; boisages, 200 fr. ; maçonnerie, 20 mètres cubes à 42 francs = 840 francs ; divers, 225 francs. Chaque tête de souterrain a coûté 12,350 francs.
e et gravier.....	
ain argileux.....	Sources. 2 puits ; profondeur maximum, 45 mètres.
ısse d'eau douce.....	
aire, marne et gypse.....	
ne et calcaire durs.....	2 puits. Par mètre courant : déblais, 80 mètres cubes à 8 francs = 640 francs ; boisages, 128 francs ; maçonnerie, 22 mètres cubes a 32 francs = 704 francs ; puits, 8 fr. 50 ; matériel, éclairage, divers, 92 francs. Les puits ont coûté 130 francs le mètre courant.
aires, argiles, sables verts res.....	Sables éboulcux aquifères.
ısse-gravier.....	7 puits : profondeur maximum, 216 mètres. Cinq galeries transversales ayant ensemble 802 mètres, la plus longue a 348 mètres. (Voir page 25.)
ıer-sable.....	
lingue et molasse.....	Voûte en briques de 0m40 d'épaisseur.
ıer-argile.....	

N° d'ordre	LIGNES DE CHEMINS DE FER	TUNNELS — NOMS	Date d'exécution	Nombre	Longueur totale	Prix du mètre courant	Profondeur totale des puits	Épaisseur moyenne des
					m.	fr.	m.	
124	SAINT-RAMBERT A GRENOBLE.....	Roize.....	1856-57	1	310	920	....	
125	CEINTURE DE PARIS..	Belleville.....	1852-53	1	1125	1.063	221.5	
126	Id.....	Charonne.....	1852-53	1	1020	1.100	162	
127	CARMAUX A ALBI	Divers.....	1856-57	2	615	1.000 à 1.200	....	..
128	LYON-CROIX-ROUSSE.	Croix-Rousse....	1860-61	1	152	1.759	....	..

TUNNELS A DEUX VOIES HORS DE FRANCE

Suisse

129	CENTRAL SUISSE.....	Läufelfingen....	1854	1	53	1.243	....	
130	Id.....	Hauenstein.....	1853	1	2496	1.900	....	..
131	Id.....	Aarau.....	1856	1	465	1.234	....	
132	Id.....	Aarburg.....	1855	1	69	1.357	....	
133	Id.....	Burgdorf.....	1855	1	510	902	....	
134	NORD-EST SUISSE ...	Bœtzberg.....	1871-75	1	2526	1.450	....	..
135	VERRIÈRES-NEUCHA-TEL.....	Divers.....	1857-60	12	2500	918 à 1.323	....	..

NATURE DU TERRAIN	OBSERVATIONS
ble-gravier	Voûte en briques de 0m50 d'épaisseur.
psc et argile	7 puits : profondeur maximum, 37 mètres. Prix par mètre courant du tunnel : déblais, 62 mètres cubes à 5 francs = 310 francs; boisage, 212 francs; maçonnerie, 16 mètres cubes à 28 francs = 448 francs; puits, 25 francs; divers, 68 francs. Les puits ont coûté 130 francs le mètre courant. L'un des puits a coûté 400 francs le mètre courant à cause de l'abondance des eaux. Voute dans les argiles 0m80 à 1m00 d'épaisseur. Durée des travaux, 20 mois.
psc et argile	7 puits : profondeur maximum, 26 mètres; prix par mètre courant 45 francs. Par mètre courant : déblais, 90 mètres cubes à 3 fr. 50 = 315 francs; boisage, 220 fr.; maçonnerie, 19 1/2 mètres cubes à 25 francs = 487 francs.; puits, 6 francs; épuisements, 15 francs; divers, 57 francs. Durée des travaux, 22 mois. Dans le plâtre la petite galerie était payée 7 francs le mètre cube et l'abattage 4 fr. 50.
gile, sable, tuf dur	
gile et cailloux roulés	Radier sur 55m50. Voûte elliptique.

TUNNELS A DEUX VOIES HORS DE FRANCE

Suisse

che oolithique	
rassique et trias	(Voir page 33.)
rassique, astartien	Durée des travaux, 18 mois.
Id.	Id. 9 mois.
ble, molasse	Id. 24 mois.
rassique et trias	Id. 50 mois.
rassique	

N.os d'ordre	LIGNES DE CHEMINS DE FER	TUNNELS — NOMS	Date d'exécution	Nombre	Longueur totale	Prix du mètre courant	Profondeur totale des puits	Epaisseur
					m.	fr.	m.	
		Angleterre						
136	LONDRES A BIRMINGHAM.....	Kilsby.....	1834	1	2204	3.410	....	..
137	LONDRES A DOUVRES.	Bleckingley.....	1840	1	1210	1.992	....	..
138	Id.....	Saltwood.....	1842	1	872	3.664	....	..
139	LONDRES.....	Sous la Tamise.	1825	1	396	23.410	....	..
		Espagne						
140	GUADARRAMA.....	Divers.....	1862	17	4758	1.700 à 2.000	....	.
141	PYRÉNÉES.....	Divers.....	1858-64	22	7549	1.100 à 1.300	....	.
142	Id	Oazurza.....	1858-64	1	2955	2.500	....	.
143	MADRID - ALICANTE - SARAGOSSE.....	Divers.....	1863	26	5876	941 à 2806	....	.
144	MANZANARES A CORDOUE.....	Divers.....	1866-67	13	3496	989 à 3874	....	.
		Belgique						
145	LIÉGE A AIX-LA-CHAPELLE.....	Divers.....	?	18	....	1.200 à 1.300	....	.
146	GUILLAUME - LUXEMBOURG.....	Id.	1862-65	18	3676	902 à 1.248	....	.

ATURE DU TERRAIN	OBSERVATIONS
	Angleterre
rre sable, beaucoup d'eau.....	Puits ayant au maximum 50 mètres de profondeur. Largeur du tunnel, 7m30. Durée des travaux, 4 ans.
gile wealdienne, dure; sable beaucoup d'eau.....	Voûte en forme d'ellipse ayant au maximum 7m32 de large et 6m30 de hauteur entre les rails et la clef de voûte. 12 puits ayant au maximum 28 mètres de profondeur et un diamètre dans œuvre de 2m75. Radier tracé avec un rayon de 6m75, épaisseur variant de 0m45 à 0m69. Les maçonneries sont en briques. Leur épaisseur est uniforme depuis la clef de voûte jusqu'au niveau des rails et varie de 0m57 à 0m915.
les verts inférieurs, beaucoup a.....	Conditions analogues au précédent. 12 puits, qui avaient au maximum 29 mètres de profondeur et ont donné jusqu'à 7 mètres cubes d'eau par heure et par puits.
....	Le tunnel sous la Tamise a été construit par Brunnel (1825-1843) ; il est formé de deux galeries juxtaposées ayant intérieurement 4 mèt. de large sur 5 mèt. de haut. La fouille avait 6m86 de haut sur 11m60 de largeur. La base de l'excavation est à 22m88 au-dessous du niveau des hautes marées. Le prix indiqué de 23,410 francs ne correspond qu'aux 183 premiers mètres exécutés. Le tunnel entier a coûté 12 ½ millions de francs. Son exécution a duré 18 ans.
	Espagne
anit.....	(Voir page 161).
caire et grès.....	(Voir page 163).
Id.	(Voir page 164).
istes pour la plupart.....	Ces tunnels ont une longueur variant de 21 mètres à 1,010 mètres.
Id.	La longueur des tunnels varie de 61 mètres à 1,025 mètres.
	Belgique
.....	Prix du déblai, 17 fr. 50 le mètre cube ; revêtements en briques payés 28 francs pour la voûte et 18 francs pour les pieds-droits. Durée des travaux, 8 mois.
histes et granwackes.....	Longueur des tunnels, 64 mètres à 594 mètres.

VII

ÉTAT

DES

TUNNELS EXISTANT EN FRANCE

A LA FIN DE 1882

Pour compléter les tableaux statistiques qui précèdent il paraît utile et intéressant de faire connaître le nombre total de tunnels existant en France, leur longueur et leur prix de revient.

Numéros d'ordre	DESIGNATION des COMPAGNIES OU RÉSEAUX	SOUTERRAINS				
		NOMBRE	LONGUEUR entre LES TÊTES	LONGUEUR MOYENNE	DÉPENSE TOTALE de CONSTRUCTION	PRIX MOYEN par mètre courant
			mètres	mètres	francs	francs
1	Nord	11	7.667	697	8.457.000	1.103
2	Est	30	21.241	622	33.538.000	1.383
3	Ouest	53	31.539	595	43.815.000	1.393
4	Paris a Orléans	126	45.537	361	57.692.000	1.267
5	Paris-Lyon-Méditerranée	407	138.389	340	166.747.000	1.205
6	Le Rhône au Mont-Cenis.	21	6.809	324	9.931.000	1.458
7	Midi	70	23.841	341	35.671.000	1.496
8	Réseau de l'Etat	24	5.345	223	7.621.000	1 426
9	Dombes et Sud-Est	18	20.203	567	5.481.000	537
10	Limoges a Eymoutiers	9	1.437	160	811.000	567
11	15 lignes diverses	26	11.440	440	14.143.000	1.236
		804	306.448	381	388.900.000	1.253
12	Chemins de l'Algérie	25	10.835	433	16 604.468	1.532

Les chiffres de ce tableau sont empruntés aux *documents statistiques* publiés par le ministère des travaux publics en 1884 et correspondent à la fin de l'année 1882.

A la fin de 1862, il n'y avait encore que 315 souterrains à une ou deux voies, mesurant 147,372 mètres de long, et ayant coûté 201,761,945 francs, soit en moyenne 1,369 francs le mètre courant. — Leur longueur moyenne était de 467 mètres.

TRAVERSÉE DU SAINT-GOTHARD

Renseignements statistiques sur 43 tunnels construits entre Immensée et Lugano

ÉLÉMENTS STATISTIQUES		TUNNELS à une voie	TUNNELS Partiellement excavé pour deux voies
Nombre des tunnels		17	26
Longueur totale		8.777m »	14.922m »
Longueur partielle	Minimum	25m 50	39m 60
	Maximum	1.941 »	1.570 »
	Moyenne	516 »	574 »
1° Excavation			
a) Cube par mètre courant.	Minimum	32m 10	39m 73
	Maximum	42 37	61 44
	Moyenne	34 87	47 15
b) Prix du mètre cube	Minimum	12 f. »	13 f. 30
	Maximum	23 20	27 60
	Moyenne	16 60	22 30
c) Prix de l'excavation par mètre courant de tunnel.	Minimum	451 f. »	537 f. »
	Maximum	804 »	1.387 »
	Moyenne	572 »	1.139 »
2° Maçonnnerie			
a) Cube au mètre courant	Minimum	3m 62	3m 75
	Maximum	16 32	16 37
	Moyenne	8 40	7 60
b) Prix du mètre cube	Minimum	25 f. 10	35 f. 20
	Maximum	39 10	51 80
	Moyenne	31 90	43 50
c) Prix de la maçonnerie par mètre courant de tunnel.	Minimum	234 f. »	429 f. »
	Maximum	551 »	1.421 »
	Moyenne	276 »	569 »
3° Prix total du mètre courant de tunnel, y compris les dépenses diverses			
	Minimum	580 f. »	923 f. »
	Maximum	1.058 »	1.582 »
	Moyenne	845 »	1.396 »

Tous les chiffres du tableau ci-dessus sont empruntés au mémoire du département fédéral des chemins de fer, année 1886-87.

Dans les terrains solides l'épaisseur de la voûte est de 0^m45 pour les tunnels à deux voies et de 0^m40 pour ceux à une voie. On laissait entre la roche et la maçonnerie un vide de 0^m10 qu'on remplissait de pierrailles.

Sur les deux rampes d'accès du grand souterrain, entre Amsteg et Biasca, la longueur des tunnels est de 15,156 mètres, dont 1,967 sont sans revêtement, soit 13 °/₀, et 2,256 mètres sont revêtus seulement en calotte, soit 15 °/₀.

Les dix-sept tunnels construits pour une seule voie ont coûté de 580 francs à 1,058 francs le mètre courant, soit en moyenne 845 francs.

Tunnels dans les calcaires. — Le long du lac des Quatre-Cantons, les tunnels sont à une voie et traversent les calcaires jurassiques ou crétacés ; leur excavation a coûté en moyenne 15 fr. 25 le mètre cube. Il y a dans cette région neuf tunnels ayant ensemble $5,288^m05$ de long. Dans le plus petit, celui de Sulzeck, de 128 mètres de long, le prix d'excavation n'a été que de 12 fr. 80 ; mais il a été de 15 fr. 20 dans celui de Oelberg, long de 1,941 mètres, de 15 fr. 70 dans celui de Axenberg, long de 1,119 mètres, et de 16 fr. 30 dans celui de Stutzeck, long de 988 mètres. L'excavation cubait de 32^m60 à 39^m90, et en moyenne 34 à 35 mètres cubes par mètre courant. Le cube maximum est celui du tunnel de Sulzeck.

Ces tunnels ont dû être revêtus sur presque toute

leur longueur. A la fin des travaux on a exécuté les pieds-droits en maçonnerie de moellons bruts quand il n'y avait pas de poussées ou pressions importantes. Le cube de maçonnerie exécuté dans ces neuf tunnels a varié de $7^{m}24$ à $14^{m}01$ et a été, en moyenne, de $7^{m}50$ par mètre courant. Ces maçonneries ont coûté de 31 francs à 39 fr. 10 et en moyenne 35 francs le mètre cube.

Le prix de ces tunnels a varié de 726 à 854 francs le mètre courant. Le prix moyen s'établit comme suit :

34 mètres cubes de déblais à 15 fr....	510 fr.
8 mètres cubes de maçonnerie à 35 fr.	280
TOTAL.....	790 fr.

Tunnels dans les gneiss. — Tous les tunnels entre Amsteg et Lugano sont dans les terrains cristallins, gneiss et micaschistes.

Entre Amsteg et Gœschenen, il y a vingt et un tunnels mesurant 7,294 mètres. Leur prix moyen d'excavation a été de 19 fr. 20 par mètre cube. Prix moyen de la maçonnerie, 41 fr. 33.

Entre Airolo et Biasca il y a quinze tunnels, dont la longueur est de 8,115 mètres. Le prix d'excavation, qui a varié de 15 fr. 65 à 25 fr. 54, a été en moyenne de 23 fr. 87. Prix moyen de la maçonnerie, 43 fr. 33.

Dans ces deux sections les tunnels sont excavés partiellement pour deux voies.

Entre Giubiasco et Lugano (ligne du mont Cenere), il y a douze tunnels à une seule voie, ayant une lon-

gueur de 4,962 mètres. Le prix d'excavation a varié de 14 fr. 23 à 22 fr. 86 et a été en moyenne de 18 fr. 96. Prix moyen de la maçonnerie, 28 fr. 07.

10° Nous donnons ci-dessous le prix de revient par mètre courant de quatre tunnels importants compris dans le tableau précédent.

NOMS des TUNNELS	LONGUEUR	EXCAVATION			MAÇONNERIE			VALEUR totale
		CUBE	PRIX	VALEUR	CUBE	PRIX	Valeur	
	mètres	mètres	francs	francs	mètres	francs	francs	francs
Mont Cenere	1.675	34 64	23 20	804	8 09	29 »	234	1.038
Leggistein...	1.089	42 23	24 90	1.051	4 16	51 80	215	1.266
Wattingen...	1.093	53 65	20 »	1.073	9 26	42 60	394	1.467
Prato.....	1.560	43 58	27 60	1.203	5 69	50 20	286	1.489

Tous ces tunnels sont dans les gneiss et micaschistes.

Le mont Cenere est à une voie.

Le Leggistein est partiellement excavé pour deux voies à la calotte.

Le Wattingen est entièrement excavé pour deux voies.

Ces deux tunnels sont sur le versant nord du Saint-Gothard et ont la forme hélicoïdale.

Prato est également hélicoïdal et se trouve sur le versant sud. On trouve encore sur ce versant trois autres tunnels hélicoïdaux dont la calotte a été excavée pour deux voies et qui sont partiellement revêtus en maçonnerie ; ils ont coûté 1,550 francs par mètre courant.

Les tunnels hélicoïdaux et celui du mont Cenere ont été percés en partie à la main et en partie à la machine ; les avancements par vingt-quatre heures ont atteint 1^m60 à 1^m80 avec la machine, tandis qu'à

[illegible] en général que de 0m50 à 0m60.
[illegible] rencontré beaucoup d'eau dans
[illegible].

Tunnels à deux voies. — Neuf tunnels construits
[illegible] réseau du Saint-Gothard et ayant
[illegible] mètres de long, ont coûté en moyenne
[illegible] mètre courant.
[illegible] nnels avec revêtement partiel et
[illegible] ng, ont coûté 1,040 francs le mètre
[illegible] mètres cubes de déblai à 9 francs,
[illegible] maçonnerie à 41 fr. 50. Le plus
[illegible] Paradiso, qui a 757m40 de long, est
[illegible] mètres au sud de Lugano.
[illegible] tunnels sont complètement murail-
[illegible] semble 1,420 mètres de long et ont
[illegible] 1,794 francs le mètre courant. Voici
[illegible] le revient d'un mètre courant de
[illegible] :

	EXCAVATION			MAÇONNERIE			VALEUR totale
	CUBE	PRIX	VALEUR	CUBE	PRIX	VALEUR	
	mètres	francs	francs	mètres	francs	francs	francs
[illegible]	[illegible]	18 50	1.090	13 68	80 90	1.107	2.196
[illegible]	[illegible]	[illegible]	504	14 31	43 70	625	1.131
[illegible]	[illegible]	11 50	1.038	53 87	50 10	2.698	3.796

[illegible] est situé à un kilomètre au
[illegible] celui de Maroggia est à 10 kilo-
[illegible] Lugano, et celui de Coldrerio à
[illegible] de Mendrizio. Ce dernier tra-
[illegible] et peu consistant.

[illegible] de l'Arlberg. — Sur les lignes

d'accès de l'*Arlberg*, on a construit neuf tunnels à une voie, ayant ensemble 1,169 mètres de long, qui ont coûté le même prix que ceux du Saint-Gothard, soit 380 florins ou 798 francs le mètre courant. (*Annales des Ponts et Chaussées*, novembre 1888.)

IX

RÈGLES A SUIVRE

POUR

LE PRIX DES GRANDS TUNNELS

... comme ceux des Alpes sont des
... âteuses qui ont donné lieu
... xpériences et de tâtonnements,
... que de tels ouvrages ne
... épensant des sommes deux
... celles dépensées généralement
... aires (1).
... les erreurs existantes sur
... nécessaire que la ligne
... l'adoption entre Calais

(1) ... Cenis avait coûté 5,400 fr. le
... uter que 2,900 fr. (page 68).
... 3,902 fr. à cause de la
... 113). L'Arlberg a coûté
... maçonnerie exécutée dans

et Milan exigera l'exécution de deux tunnels ayant chacun 21 1/2 kilomètres de long ; le moment paraît ainsi tout à fait opportun pour étudier avec soin la question du coût des grands souterrains. Nous allons donc passer en revue les divers éléments qui composent les frais d'exécution de ces ouvrages et chercher à en établir la dépense normale d'une manière rationnelle.

Nous considérerons successivement :

1° La forme et les dimensions à donner aux tunnels à *deux voies* ;

2° Les frais d'excavation ;

3° Le prix des maçonneries ;

4° L'influence de la longueur des souterrains et de la vitesse d'exécution sur les frais de construction.

I° FORME ET DIMENSIONS DES TUNNELS

Historique. 1826. — Les premiers tunnels pour chemin de fer ont été construits de 1826 à 1833 par les frères Séguin, sur la ligne de Lyon à St-Etienne, laquelle avait 55 kilomètres de long. Ces tunnels, au nombre de quatorze, avaient un développement total de3,954 mètres et le plus considérable, celui de Terre-Noire, avait 1,500 mètres de long. Ils étaient à une voie et présentaient intérieurement $3^{m}30$ de largeur maximum avec $4^{m}50$ de hauteur entre la clef de voûte et le niveau des rails ; à ce même niveau la largeur était réduite à 3 mètres. La voûte avait $1^{m}50$ de

[illegible]te-forme par des pieds-droits [illegible] de 5 mètres. Ajoutons qu'ils [illegible] deux voies en 1856.

[illegible] — **Ligne de Londres à Birmin-**[illegible] par Robert Stephenson.

[illegible] **de Kilsby.** — Ce souterrain a une [illegible] mètres et une largeur maximum de [illegible] 7 mètres au niveau des rails; [illegible]ails et la clef de voûte est de [illegible]ptique; le rayon de l'arc du [illegible] celui des pieds-droits dans leur [illegible] de 13 mètres. Le radier est tracé [illegible] mètres.

[illegible] — **Lignes de Saint-Germain et de** [illegible]s de ces lignes (Saint-Cloud et [illegible]ture; ils ont 7m40 de largeur [illegible] voûte et 7 mètres au niveau des [illegible] 1m80 et les accotements 1m10 [illegible]ieds-droits sont profilés avec une [illegible] rayon. La hauteur entre les rails [illegible] de 6 mètres.

[illegible] — **Ligne de Londrès à Douvres,** [illegible] ingénieur Cubitt.

[illegible] **Shakewell** et de **Bleckingley.** — Ces [illegible] à celui de Kilsby, sauf la hau-[illegible] de 7m30 et le rayon des pieds-droits [illegible]. — Les maçonneries sont en [illegible] une épaisseur uniforme variant de [illegible] suivant la nature du terrain.

1840-1847. — Les souterrains construits en France pendant cette période sont généralement en plein cintre avec pieds-droits verticaux, notamment sur les lignes de Bordeaux et de Strasbourg. Leur largeur est de 7^{m} 40 au niveau des rails et leur hauteur de 5^{m} 50 entre les rails et la clef de voûte.

1847. — La Compagnie de Paris à Lyon donne à ses souterrains une largeur de 8 mètres et une hauteur de 6 mètres, celle d'Orléans leur donne 7^{m}80 sur 5^{m}90.

1853-1857.—En novembre 1853, le gouvernement français ordonna une enquête générale sur les chemins de fer, et voici sommairement les chiffres et les observations présentés à cette enquête par les principales Compagnies relativement à leurs tunnels.

NOMS des COMPAGNIES	TUNNELS			
	NOMBRE	LONGUEURS	LARGEURS	HAUTEURS
Nord.....	4	773^{m} 60	7^{m}20 et 7^{m}60	5^{m} à 6^{m} 15
Est.....	»	11342 »	7^{m} 40	5^{m} 20
Paris-Lyon.....	13	6643 »	8 »	6 »
Lyon-Méditerranée	7	6313 »	8 »	4^{m}82 à 7^{m}50
Orléans.....	20	8932 »	7 40	5 44 à 5 90
Ouest.....	....	.....	7^{m} et 7 40	5 50 à 6 50

Disons ici que la Compagnie du Nord n'a pas présenté d'observations sur les dimensions de ses tunnels. Celle de l'Est a déclaré que la largeur de ses souterrains était insuffisante et a proposé d'adopter 8 mètres de large sur 5^{m} 65 de haut. La Compagnie de Paris-

Lyon a indiqué que 7^m30 de large et 5^m60 de haut étaient à peine suffisants. Suivant la Compagnie d'Orléans 7^m40 sur 5^m75 paraissaient acceptables. La Compagnie Lyon-Méditerranée a déclaré que 7^m50 sur 5^m75 lui paraissaient convenables. Enfin pour la Compagnie de l'Ouest une largeur de 7^m40 au niveau des rails était suffisante.

1857.— A partir de 1857 le gouvernement français a prescrit dans les cahiers de charges des diverses lignes à construire les dimensions minima suivantes, savoir :

Largeur libre au niveau des rails, 8 mètres;
Hauteur entre les rails et la clef de voûte, 6 mètres;
Hauteur libre au-dessus des rails extérieurs, 4^m80.

Antérieurement à 1857 les cahiers de charges ne prescrivaient pour ces dimensions respectives que les chiffres : de 7^m40, 5^m50 et 4^m60. Cette hauteur de 4^m60 est indispensable avec les voûtes en plein cintre pour permettre l'ouverture des portières des voitures de voyageurs.

Forme des Tunnels.— Quant à la forme générale des tunnels, c'est la voûte de 8 mètres de diamètre avec pieds-droits verticaux qui a prévalu en France. Cette forme, qui est la plus simple et la plus économique, satisfait à tous les besoins du service et donne toute sécurité. Au début des chemins de fer on a cependant commencé par imiter les Anglais qui avaient préféré pour leurs tunnels un périmètre elliptique, mais cette solution n'a guère été appliquée en France pour les tunnels à deux voies ; il faut excepter cependant les

lignes du Havre et de Cherbourg où l'on trouve 18 tunnels avec ellipse; celle de Nevers à Lyon où on en compte 21; enfin la ligne d'Avignon-Marseille-Toulon où il en existe huit.

Lorsque le terrain est résistant et n'exerce pas de poussée sur les maçonneries la forme de l'intrados d'un tunnel n'a pas une grande importance et la seule chose à considérer est de réduire la dépense de construction au minimum en limitant la section de l'ouvrage à celle qui est strictement exigée par les besoins du service; mais il n'en est plus de même quand on rencontre des terrains exerçant sur les maçonneries des pressions diverses dont il faut tenir compte si on veut leur résister efficacement.

Formules d'équilibre. — Dans les terrains difficiles on doit toujours avoir présents à l'esprit les principes suivants relatifs à la résistance des voûtes :

1° Lorsqu'un arc est soumis à des forces ayant une intensité constante et agissant normalement à sa courbe :

a) La courbe d'équilibre est un cercle;

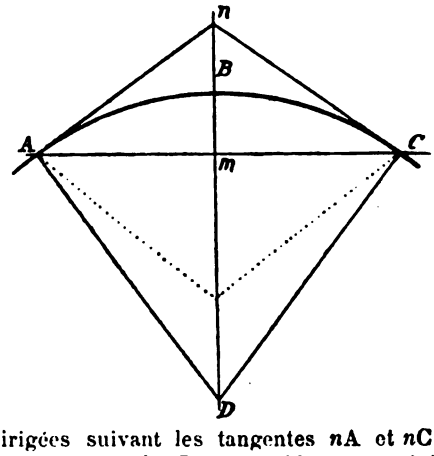
b) La tension qu'éprouve cet arc (soit la pression sur les joints quant il s'agit d'une voûte) est constante et égale à la force normale multipliée par le rayon de l'arc, de sorte que si l'on appelle R ce rayon et p la pression par unité de longueur de l'arc, la tension sera partout égale à pR.

2° Si les forces agissant sur l'arc sont parallèles entre elles, la tension de cet arc est encore constante

et égale au produit de la force multipliée par le rayon de ce même arc (1).

En appliquant ces considérations aux maçonneries d'un tunnel on peut dire que dans les deux hypothèses ci-dessus la pression sur les joints de la voûte est sensiblement constante, pourvu que la pression extérieure soit très grande relativement au poids même de la voûte, lequel poids devient alors une quantité négligeable.

Il faut bien remarquer que dans les ouvrages construits à ciel ouvert, tels que les ponts, on donne aux voûtes et aux culées des épaisseurs suffisantes pour que ces ouvrages soient en équilibre stable par eux-mêmes et que les poussées au vide ne puissent pas causer la rupture des maçonneries ou leur renverse-



(1) Voici une démonstration fort simple de ce théorème :

Soit ABC l'arc considéré.

AC la corde = 2L.

DA = R, le rayon de l'arc.

p la pression verticale et uniforme par mètre courant.

La pression totale sur la longueur AC sera 2*p*L. Cette force peut être remplacée par deux autres que nous appellerons Q et dirigées suivant les tangentes *n*A et *n*C. En représentant par *nm* la valeur de *p*L, et considérant que les deux triangles A*nm* et DA*m* sont semblables, on aura la proportion :

mn : *n*A :: A*m* : DA ; ou :

*p*L : Q :: L : R ; d'où Q = *p*R = constante.

ment, on ne tient par suite aucun compte des pressions latérales des remblais, alors même qu'elles pourraient compenser en partie la poussée de la voûte.

Dans les souterrains, au contraire, le terrain offre généralement aux poussées de la voûte une résistance indéfinie, et il suffit, pour que celle-ci résiste aux pressions extérieures, que son épaisseur soit assez forte pour empêcher l'écrasement des matériaux qui entrent dans sa construction.

On comprend dès lors combien il importe dans les terrains ébouleux de maçonner sans retard avant qu'ils aient perdu leur cohésion et cessé ainsi d'offrir une résistance absolue aux poussées de la voûte. Il importe également de remplir avec soin les vides existant derrière les maçonneries afin qu'elles ne puissent pas perdre leur équilibre (1).

(1) Voici les observations que les frères Seguin faisaient déjà il y a 50 ans au sujet des travaux de tunnel dans les terrains ébouleux. (Voir l'ouvrage publié en 1839 par Seguin aîné et ayant pour titre : *De l'influence des chemins de fer et de l'art de les tracer et de les construire*) :

« Les schistes houillers, en général, présentent le grave inconvénient de s'exfolier à l'air, et il convient de faire le revêtement aussitôt qu'un emplacement de 3 à 4 mètres est terminé. Si le terrain a pu être contenu de manière à ne faire aucun mouvement pendant le temps de l'excavation, et que l'on puisse faire la maçonnerie avant qu'il se soit manifesté aucun accident, on peut présumer que la galerie sera peu exposée à se déformer ; mais pour cela il faut absolument qu'elle soit appuyée de toutes parts contre le rocher.

» Les éboulements partant du sommet présentent les plus grands dangers, et l'on ne saurait apporter trop de soins à bien soutenir le terrain. Une fois que les roches se sont mises en mouvement par l'effet d'une secousse, les joints tendent à s'ouvrir, les bois sont écrasés. Il est essentiel, dans ces circonstances périlleuses, d'employer des matériaux d'un fort échantillon, d'une grande

Dans le cas où l'on ne pourrait pas faire derrière les maçonneries un remplissage résistant, il serait nécessaire de donner à celles-ci la forme et les dimensions adoptées pour les ouvrages d'art exécutés à ciel ouvert : c'est ce qui a lieu généralement dans les tunnels exécutés en tranchée ou à travers des terrains compressibles.

On peut déduire des principes ci-dessus, diverses conclusions qui s'appliquent à la forme et aux dimensions à donner aux maçonneries d'après les pressions qu'elles ont à supporter. Nous allons donc examiner quelques-uns des cas qui se présentent le plus fréquemment.

1° Pressions verticales. — Lorsque la voûte doit supporter une charge verticale importante, on peut être amené à lui donner une forme elliptique afin de diminuer son rayon de courbure au sommet et augmenter ainsi sa résistance. C'est ce qui a été fait par les Anglais dans les tunnels déjà cités, où le rayon à la clef de voûte n'a que $2^{m}745$.

A la Nerthe, près de Marseille, on a également

dureté, et de restreindre le travail dans les plus étroites limites, en entreprenant peu à la fois et terminant promptement. Pour avoir négligé cette précaution, j'ai perdu à Terre-Noire une galerie de 15 mètres, dans laquelle était survenu un éboulement. L'accident arriva jusqu'au jour, et fut tellement grave que je dus renoncer à le réparer et porter l'axe du percement à 15 mètres de là. Malgré cette distance, le vide occasionné par l'excavation de la galerie ayant dû être comblé, et le mouvement qu'éprouvèrent les roches voisines s'étant communiqué de proche en proche, on s'aperçut cinq à six ans après que les maçonneries du percement en face du point où avait eu lieu l'accident se rejetaient de ce côté. Il fallut alors les reprendre toutes pour les remettre dans l'alignement ».

construit une voûte elliptique avec rayon de 2^m95 à la clef ; la résistance de la voûte au sommet est dans ce cas de 30 °/₀ environ plus élevée que celle obtenue avec un rayon normal de 4 mètres.

Dans ces divers tunnels l'épaisseur de la maçonnerie est constante entre la clef et le niveau des rails.

Les voûtes elliptiques ont l'inconvénient d'être d'une exécution plus compliquée que celles en plein cintre et d'obliger en outre à augmenter la hauteur du tunnel d'environ 1 mètre ; à la Nerthe, l'augmentation de hauteur est même de 1^m50. Cette solution ne paraît donc pas économique.

2° Pressions latérales. — Lorsque la charge éprouvée par les maçonneries est horizontale au lieu d'être verticale, elle agit activement sur les pieds-droits auxquels il convient alors de donner de fortes courbures comme dans les exemples suivants :

Tunnel de Hardelot. — Une tranchée qui éprouvait des mouvements inquiétants sur la ligne d'Amiens à Boulogne a été remplacée en 1847 par un tunnel ayant la forme d'une ellipse complète, dont le grand axe a 8^m60 et est horizontal, tandis que le petit axe, qui est vertical, n'a que 6^m60. Cette ellipse est tracée au moyen de deux rayons, l'un de 2^m50 seulement, qui résiste efficacement à la poussée horizontale et l'autre de 5 mètres. La maçonnerie a une épaisseur uniforme de 0^m80, sauf dans la partie formant radier qui n'a que 0^m40. La largeur libre au niveau même des rails n'est, pour les deux voies, que de 6^m60, y compris 1^m80 d'entrevoie et deux accotements de 0^m90.

Tunnel de Charonne à Paris. — La tranchée à l'amont de ce tunnel avait été ouverte dans des argiles mouillées qui se sont mises en mouvement après l'ouverture de la ligne à l'exploitation en 1854. Le mouvement s'étendait à plus de 100 mètres de distance et la plate-forme elle-même se soulevait souvent de 0m60 dans une seule nuit ; il en résultait pour la voie des déformations qui la rendaient fort dangereuse. Afin de remédier à cette situation, M. l'ingénieur Boucher a prolongé le tunnel sur 70 mètres de longueur et lui a donné une forme tubulaire avec un rayon de 4m03, sauf au-dessous de la voie où on a exécuté un radier de 9 mètres de rayon. Ce radier n'a que 0m60 d'épaisseur, mais pour la voûte on a adopté 0m90 d'épaisseur à la clef en l'augmentant jusqu'à 1m50 au niveau des rails ; elle est extradossée avec un rayon de 5m50.

Au fur et à mesure de leur exécution les anneaux de maçonnerie étaient chargés au moyen d'un remblai de 4 à 5 mètres de haut, ce qui empêchait leur soulèvement, cette charge devait produire sur les joints une pression d'environ 6 kilog. par centimètre carré.

Pour ces 70 mètres de tunnel on a dépensé 1,533 francs par mètre courant, y compris les murs en aile et le remblai au-dessus de la voûte.

3° Pressions en tous sens. — Si la pression est sensiblement égale sur tout le pourtour d'un tunnel (comme cela a plus ou moins lieu dans quelques argiles fluentes et dans les sables imprégnés d'eau), il convient de donner à la maçonnerie la forme d'un tube circulaire à épaisseur uniforme ; mais en général, dans les plus mauvais terrains la poussée est bien moindre

sous la plate-forme de la voie que sur les côtés ou à la clef de la voûte, aussi peut-on souvent se contenter de donner au radier un rayon plus grand qu'au reste du tunnel et lui donner en outre une épaisseur moindre. C'est ce qu'on a fait dans les deux souterrains qu'on vient de citer.

Dans la traversée des Pyrénées (ligne de Madrid à Irun), le terrain, près des têtes de tunnels, était quelquefois composé de schistes désagrégés et aquifères ou d'alluvions argileuses imprégnées d'eau. De là naissaient des poussées considérables que j'ai combattues avec succès en donnant aux maçonneries une forme analogue à celle du tunnel de Charonne, sauf le rayon du radier qui a 16 mètres au lieu de 9 mètres. La voûte et les pieds-droits ont en outre un rayon de 4^m40 et une épaisseur constante. Ce rayon de 4^m40 était nécessaire : 1° pour conserver une largeur libre de 8 mètres au niveau des rails et une hauteur de 6 mètres ; 2° pour tenir compte du surhaussement de la voie dans les courbes ainsi que des irrégularités dans le parement des maçonneries. Il faut aussi observer que le matériel roulant du Nord de l'Espagne a 3^m35 de largeur, c'est-à-dire 0^m35 de plus que le matériel français.

4° Pieds-droits. — Dans les divers exemples que nous venons de signaler, il a été procédé d'une manière rationnelle et conforme aux principes déjà exposés ; mais on rencontre fréquemment des tunnels où l'on a opéré d'une autre manière. C'est surtout au sujet des pieds-droits que se produisent des diver-

gences d'opinions portant à la fois sur la forme et sur l'épaisseur à leur donner.

Forme des pieds-droits. — En ce qui concerne la forme des pieds-droits, beaucoup d'ingénieurs, notamment en Allemagne, donnent toujours la même forme aux tunnels, quel que soit le terrain traversé, et en effectuent le tracé au moyen de trois éléments:

a) La voûte est un plein cintre ayant 4 mètres de rayon.

b) Les pieds-droits sont tracés avec un rayon double du précédent, soit 8 mètres.

c) Enfin le radier (quand il y en a un) a la forme d'un arc dont le centre est placé à la clef même de la voûte.

Le tunnel du Hauenstein, près de Bâle, est un exemple classique de cette méthode.

Ce tracé graphique, constamment le même, est fort simple en principe, mais tout à fait arbitraire et peu rationnel, aussi bien pour le radier que pour les pieds-droits.

La forme cintrée ou inclinée de ces derniers semble empruntée aux murs de soutènement dont le parement vu est ordinairement construit avec un fruit plus ou moins prononcé.

Cette forme a le très grave inconvénient de réduire de 0^m40 la largeur du tunnel au niveau des rails, de sorte que si, comme au Hauenstein, la voûte a 7^m80 de diamètre, la largeur libre au niveau des rails se réduit à 7^m40.

Cette largeur ne laisse que 0^m40 de libre entre les marche-pieds des wagons et les maçonneries; on a donc un espace insuffisant et dangereux pour les ou-

vriers qui peuvent être surpris par un train avant d'avoir pu se garer dans une niche. Cette largeur est aussi trop faible pour qu'on puisse déposer sans danger à côté de la voie le matériel et l'outillage nécessaires aux réparations.

C'est donc avec raison que depuis 1857 il est prescrit en France de laisser une largeur minimum de 8 mètres au niveau des rails afin d'avoir un espace libre de 0^m75. Si cette largeur de 8 mètres paraît utile, même pour les petits tunnels, elle est certainement indispensable dans les grands tunnels où les ouvriers se trouvent plus isolés et par conséquent plus exposés à des surprises et à des accidents que dans des tunnels ordinaires.

Il convient par suite de donner aux pieds-droits un parement vertical, à moins que des poussées latérales considérables obligent à leur donner une forte courbure pour augmenter leur résistance.

Dimensions des tunnels des Alpes. — Le tableau suivant donne les principales dimensions des souterrains des Alpes et du Hauenstein :

ELÉMENTS DU PROFIL DES TUNNELS	HAUENSTEIN	MONT-CENIS	SAINT-GOTHARD — GRAND TUNNEL — Rocher	SAINT-GOTHARD — GRAND TUNNEL — Mauvais terrain	SAINT-GOTHARD — PETITS Tunnels	ARLBERG	SIMPLON projet 1882
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres
Rayon de la voûte.....	3.90	4 »	4 »	4 »	4.10	4 »	4.10
— des pieds-droits	7.80	10.10	∞	5 »	10.10	10.10	10.20
— du radier.....	8.10	7.72	....	6.52	.....	5 93	5.93
Hauteur de la clef de voûte au-dessus des traverses.....	6 »	6.10	6 »	6 »	6.10	6 »	6 »
Largeur libre au niveau des traverses.....	7.20	7.60	8 »	6.93	8	7.50	7.78

(1) Les chiffres pour le Mont-Cenis sont empruntés au Mémoire publié par M. Conte dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, année 1863. Suivant cet ingénieur ce tunnel est en plein cintre, mais d'après M. Revaux *(Annales des Mines* 1879) et suivant M. Figuier *(Nouvelles Conquêtes de la Science)* le tunnel aurait une forme elliptique tracée avec 4 rayons variant de 3^m15 au sommet à 12^m60 à la base.

(2) et (3) Les chiffres de ces colonnes sont empruntés au *Bulletin de la Société Vaudoise des Ingénieurs et Architectes* (année 1882). Le Mémoire du département fédéral des chemins de fer (année 1886-1887) porte que le type normal du tunnel avait 6 mètres de haut, 8 mètres de large au niveau des naissances de la voûte et 7^m60 au niveau des rails: il en résulte pour les pieds-droits une courbure de 10^m10 de rayon.

(4) Chiffres extraits du Rapport fait en novembre 1878 par M. l'ingénieur Kauffmann chargé par la Compagnie de l'inspection des travaux.

(5) Dans les tunnels en courbe le rayon de la voûte est de 4^m10.

(6) Projet de M. Meyer, ingénieur en chef de la Compagnie de la Suisse Occidentale. Comme on le voit ce projet reproduit sensiblement les types de l'Arlberg.

Epaisseur des pieds-droits. — Dès le début des chemins de fer les Anglais ont donné aux pieds-droits de leurs tunnels à forme elliptique la même épaisseur qu'à la voûte. En France il en est généralement de

même dans tous les tunnels, sauf le cas de poussées latérales exceptionnelles qui obligent à renforcer les pieds-droits.

Quelques ingénieurs donnent aux pieds-droits une épaisseur beaucoup plus forte qu'à la voûte, même dans les terrains solides qui n'exercent aucune pression sur les maçonneries, il est cependant évident que dans ce cas les pieds-droits n'ont d'autre charge à porter que le poids de la voûte, lequel équivaut à environ 1 1/2 kil. par centimètre carré aux naissances et à 2 kil. au niveau de la plate-forme du chemin de fer. Cette charge est donc beaucoup trop faible pour qu'il y ait lieu de donner à ces pieds-droits une épaisseur plus grande qu'à la voûte. On pourrait même se contenter d'une épaisseur moindre, ce qui est une raison de plus pour supprimer tout fruit à leur parement.

Dans le cas où la voûte supporte une charge verticale uniformément répartie sur toute sa largeur, on a vu que la pression sur les joints était constante entre la clef et les naissances et égale à pR, et cela non compris la tension due au poids même de la maçonnerie. Si donc l'épaisseur du revêtement a été calculée dans le but que la pression ne dépasse pas par exemple 6 kilogrammes par cent. carré à la clef, il faudra augmenter cette épaisseur aux naissances de 25 0/0 environ afin de tenir compte du poids de la voûte (1).

Cette augmentation pourra d'ailleurs être inutile si

(1) Si l'on veut calculer exactement la surépaisseur à donner aux naissances de la voûte, on peut le faire facilement par le calcul suivant.

Soit a épaisseur à la clef — X celle des naissances — R la pression admise sur les joints de la maçonnerie par unité de surface. — Supposons que le poids de la maçonnerie soit de 2,000 kilos, et

la charge extérieure à la voûte au lieu d'être uniformément répartie sur toute sa largeur était localisée à son sommet ou plus considérable à la clef que sur les reins, comme dans le cas par exemple où un éboulement se produirait au sommet de la voûte sur 4 à 5 mètres seulement de largeur. La pression sur les joints aux naissances se réduirait alors à la moitié environ de celle existant à la clef et on devrait par conséquent donner aux naissances une épaisseur de maçonnerie plus faible qu'à la clef.

Si un éboulement avait la forme d'un prisme reposant sur toute la largeur de la voûte, la pression qu'il produirait ne serait pas toujours répartie uniformément, car soit par sa forme, soit à cause des frottements existant sur les parois du prisme, soit enfin par l'arc-boutement naturel des matériaux, il est probable que la charge serait beaucoup plus grande sur la clef de la voûte que sur les reins et les naissances, cela permettrait donc de réduire l'épaisseur aux naissances au lieu de l'augmenter.

Nous complétons ces observations en donnant dans le tableau suivant les dimensions appliquées aux maçonneries dans les tunnels des Alpes et au Hauens-

que la longueur moyenne de l'arc de la demi-voûte soit de 6m50. Le poids de celle-ci sera $= \frac{2a + X}{2}$ 6, 5 $\times$ 2000. La pression totale aux naissances sera égale à $\frac{2a + X}{2}$ 6, 50 $\times$ 2000 + Ra, quantité qui devra être égale à $(a + X)$ R.

D'où $\frac{X}{a} = \frac{13000}{R - 6500}$ — Si on suppose successivement que la pression sur les maçonneries soit de 6 ou 10 kilogr. par centimètre carré, on aura pour les valeurs correspondantes de $\frac{X}{a}$ 0,24 et 0,14.

tein ; elles justifient tout ce que nous avons dit relativement aux divergences de vue et aux procédés arbitraires qui semblent exister au sujet des dimensions à adopter.

DÉSIGNATION DES TUNNELS	Épaisseur de la voûte en centimètres				OBSERVATIONS
	à la clef	aux naissances	AUGMENTATION effective	AUGMENTATION p. 0/0	
Hauenstein ...	39	48	9	23	
	48	48	0	0	
	60	75	15	25	
St-Gothard ...	40	60	20	50	Chiffres extraits des types publiés dans le « Bulletin de la Société Vaudoise » des Ingénieurs et Architectes, année 1882.
	100	150	50	50	
Arlberg.....	50	50	0	0	
	65	80	15	23	Idem.
	80	110	30	40	
	90	125	55	40	
Simplon	40	40	0	0	
	50	75	25	50	Projet de M. l'ingénieur Meyer, 1882
	60	95	35	60	
	70	100	30	43	
	80	110	30	40	
	100	130	30	30	

Utilité de réduire l'épaisseur des pieds-droits. — On a vu qu'il était indispensable de donner aux pieds-droits une courbure suffisante pour résister à toute poussée latérale effective ou éventuelle. Dans les exemples cités à ce sujet, si l'on avait adopté pour les pieds-droits un rayon de 8 m. (au lieu de $2^{m}50$ donné au tunnel de Hardelot, ou de 4 m. pour celui de Charonne), il aurait fallu se résoudre à des épaisseurs doubles et même quadruples de celles qui ont été appliquées. Un grand rayon donné aux pieds-droits augmente beaucoup les frais de construction en terrain éboulueux ; mais il a un inconvénient bien plus

grave encore, celui d'aggraver considérablement les difficultés de construction. En augmentant l'épaisseur des pieds-droits, les fouilles devenant plus considérables disloquent le terrain sur une plus grande largeur, ce qui augmente encore la pression à supporter par les maçonneries dont l'épaisseur doit croître en proportion : on tombe ainsi dans un cercle vicieux.

On comprend aussi que plus le mouvement s'étend en largeur plus le terrain perd de sa cohésion, plus on voit diminuer les arc-boutements intérieurs et les frottements qui ont pour effet d'alléger la charge des maçonneries. Il convient donc de réduire dans la limite du possible la largeur des fouilles, et pour atteindre ce but on donnera aux pieds-droits un faible rayon de courbure. On diminuera aussi l'épaisseur des maçonneries par l'emploi de matériaux de qualité supérieure et par le soin apporté à leur exécution.

On se rend facilement compte par le calcul des inconvénients résultant d'une grande épaisseur des pieds-droits. Appelons e l'épaisseur commune de la voûte et des pieds-droits aux naissances et h la hauteur du terrain disloqué qui charge les maçonneries ; supposons, d'autre part, que ce terrain pèse 2,000 kilog. le mètre cube, et que la voûte ait intérieurement 8 mètres de diamètre, le poids du prisme reposant sur celle-ci sera $(2e + 8)\ h.\ 2.000$.

En appelant R la pression maximum par mètre carré à supporter par la maçonnerie, la résistance aux naissances de la voûte sera égale à $2e\mathrm{R}$ et on aura $(2e + 8)\ h.\ 2.000 = 2e\mathrm{R}$.

Cette équation donne la relation qui doit exister entre l'épaisseur de la voûte et la hauteur du prisme

à supporter. C'est une hyperbole qui donne les résultats numériques consignés dans le tableau ci-dessous où deux hypothèses pour la valeur de R ont été adoptées, l'une correspondant à une pression de 50,000 kilogrammes et l'autre à une pression de 100,000 kilogrammes par mètre carré de maçonnerie.

HAUTEUR h	ÉPAISSEUR e POUR	
	R = 50,000 KIL.	R = 100,000 KIL.
Mètres	Mètres	Mètres
5	1 »	» 50
10	2.70	1 »
15	6 »	1.70
20	16 »	3 »
25	∞	4 »
36	—	10 »
40	—	∞

Revêtements dans les terrains solides. — Beaucoup de tunnels à deux voies n'ont aucun revêtement même à la voûte lorsqu'ils traversent un rocher solide. Ainsi dans le grand tunnel de la Nerthe 870 mètres, soit environ 20 °/₀ de la longueur totale, ne sont pas muraillés. Au Hauenstein, la proportion est de 17 °/₀, et au tunnel des Loges (à une voie) elle atteint 38 1/2 °/₀.

Dans les grands tunnels des Alpes au contraire, on a fait un revêtement même dans les roches les plus dures ; mais il est permis de penser qu'il y a eu là quelque exagération. Il semble aussi qu'il y a excédent d'épaisseur au Saint-Gothard où sur les 4/5 de la lon-

gueur, on a donné 0^m40 d'épaisseur aux maçonneries et à l'Arlberg où l'épaisseur minimun est même de 0^m50. Au Hauenstein le revêtement minimum a 0^m39 d'épaisseur sur 578 mètres de longueur.

Au tunnel de la Nerthe au contraire, on a réduit l'épaisseur à 0^m23 sur 1,320 mètres de long, en faisant le revêtement en brique. Cette dernière solution a été imitée dans d'autres tunnels.

Au Saint-Gothard le revêtement de 0^m40 a été payé 840 fr. le mètre courant, somme considérable et hors de toute proportion avec le résultat à obtenir.

Il y a 50 ans, M. l'ingénieur Minard enseignait déjà à l'Ecole des Ponts et Chaussées de Paris, que lorsqu'un revêtement n'avait pour but que de garantir le terrain contre des influences atmosphériques, il suffisait d'une épaisseur de 0^m20 à 0^m30 même quand l'ouverture du tunnel atteignait 8 mètres, et il citait comme exemple les souterrains de Saint-Quentin et de Thamès et Madway. (Voir son *Cours de construction*, année 1841, page 297.)

Depuis cette époque l'art des constructions en maçonnerie a fait de très grands progrès, grâce à l'étude et à l'emploi généralisé des chaux hydrauliques; on doit donc profiter des résultats obtenus pour réduire au strict nécessaire l'épaisseur des revêtements, car il n'est pas logique de faire sauter à grands frais des roches dures et résistantes pour les remplacer par une maçonnerie coûteuse qui offre souvent moins de solidité et de sécurité que le roc lui-même.

Si la roche est susceptible de se désagréger et de causer la chute de quelques pierres ou pierrailles, il faut nécessairement la revêtir, mais il est inutile de

donner à la maçonnerie une épaisseur allant à 0^m40 et 0^m50, puisqu'elle n'aura à supporter aucune charge extérieure. Une épaisseur réduite à 0^m10 ou 0^m15 serait très suffisante et s'obtiendrait facilement par l'emploi du béton. On réaliserait ainsi une économie de 60 %, ce qui, au Saint-Gothard en particulier, aurait réduit d'environ 500 fr. les frais par mètre courant.

Le béton est devenu d'usage courant pour les travaux de sujétion à faible épaisseur, tels que les égouts, les cloisons, etc., etc. Dans un tunnel il aurait en outre le grand avantage de se prêter beaucoup mieux que de gros moellons à épouser les sinuosités et les aspérités du rocher.

Radier. — La construction d'un radier peut être nécessaire dans deux cas, celui où les pieds-droits sont sollicités par des forces latérales qui tendent à les rapprocher, et celui où la plate-forme est soumise elle-même à des pressions verticales qui la soulèvent et compromettent la stabilité des maçonneries.

1er Cas. S'il ne s'agit que de maintenir l'écartement des pieds-droits et que ceux-ci soient formés d'un arc ayant par exemple 4 mètres de rayon, on fixera facilement l'épaisseur du radier en remarquant qu'au niveau des rails le joint des maçonneries aura une inclinaison d'environ 30°.

La pression qui agit normalement sur ce joint pourra être décomposée en deux, l'une verticale et l'autre horizontale. La première sera détruite par la résistance du sol, et la seconde, qui représentera l'effort à supporter par la maçonnerie du radier, sera

au plus égale à la moitié de la pression effective sur les joints des pieds-droits ; l'épaisseur du radier sera donc largement suffisante, en la prenant égale à la moitié de celle des pieds-droits.

L'épaisseur des radiers varie beaucoup et dans plusieurs cas semble avoir été fixée arbitrairement : ainsi au tunnel de Saint-Pierre sur la ligne de Nevers à Roanne, elle n'est que de 0^m30. Aux tunnels de la Nerthe et de Saint-Louis près Marseille, et sur la ligne de Londres à Birmingham, l'épaisseur minimum est de 0^m35. Elle est de 0^m40 au tunnel d'Hardelot ; de 0^m45 au souterrain du Hauenstein, à celui du Credo et dans les souterrains entre Londres et Douvres. Remarquons que sur cette dernière ligne on avait, au début, adopté une épaisseur de 0^m69. Aux tunnels de Lormont près de Bordeaux, à ceux de Blaizy et autres, on a donné une épaisseur de 0^m50.

Quant au rayon suivant lequel il faut profiler le radier, beaucoup d'ingénieurs prennent arbitrairement le sommet de la voûte comme centre de l'arc à tracer, ce qui correspond à un rayon de 7 à 8 mètres. Ce rayon a le grand inconvénient de donner une flèche de 1 mètre environ, qui, ajoutée à l'épaisseur du ballast, place la clef du radier à 1^m50 au-dessous du rail. Cette grande profondeur, que rien ne justifie, produit un surcroît de dépenses qu'il convient d'éviter en prenant un rayon plus grand.

Dans quelques tunnels on a donné jusqu'à 20 mètres à ce rayon, mais une longueur de 16 mètres est suffisante et a de plus l'avantage de placer la clef du radier à un niveau sensiblement égal à celui où

l'on établit généralement le fond de l'aqueduc central, soit à 0^{m}90 sous le rail.

2^{me} *Cas*. Lorsque la plate-forme est soumise à des pressions verticales, il est difficile de donner des règles pour fixer l'épaisseur et le rayon du radier. Il appartient à l'ingénieur de déterminer ces dimensions suivant les circonstances. Nous avons vu qu'au tunnel de Charonne le radier avait 0^{m}60 d'épaisseur et un rayon de 9 mètres; dans les Pyrénées, l'épaisseur était également de 0^{m}60 mais le rayon avait 16 mètres. A l'Arlberg les types pour maçonnerie prévoyaient des épaisseurs de 0^{m}65 et 0^{m}80 avec rayon de 5^{m}93 et au Saint-Gothard les épaisseurs étaient 0^{m}60 et 0^{m}80 avec rayon de 6^{m}52.

Aqueducs. — Dans les tunnels où l'on ne rencontre pas d'eau les aqueducs peuvent être supprimés. Lorsqu'il y a lieu d'en construire on leur donne des dimensions proportionnées au cube d'eau à débiter. La forme de ces ouvrages varie à l'infini et leurs dimensions sont souvent exagérées.

Sur les premiers chemins de fer construits en Angleterre, les aqueducs ont été placés au centre du tunnel; ils ont la forme d'un demi-cercle avec un rayon intérieur de 0^{m}15 à 0^{m}70. Dans l'un de ces tunnels on a supprimé l'aqueduc, mais on a ménagé des rigoles le long des pieds-droits en soutenant le ballast par des murs en maçonnerie.

En France au tunnel de la Nerthe et dans quelques autres, on a appliqué le type anglais, en donnant à la voûte de l'aqueduc un rayon variant de 0^{m}40 à 0^{m}70.

Sur les lignes de Strasbourg, de Caen et dans quel-

ques tunnels du réseau d'Orléans on n'a établi que des rigoles latérales et découvertes, leur fond est souvent au niveau même de la plate-forme, mais quelquefois il est placé à 0^m10 ou 0^m30 au-dessous. Ces rigoles ont 0^m20 à 0^m30 de largeur.

Sur la plus grande partie du réseau d'Orléans on a remplacé les rigoles ouvertes par de petits aqueducs adossés aux pieds-droits et ayant de 0^m20 à 0^m30 de largeur et de hauteur, leur radier est à une profondeur variant de 0^m50 à 0^m90 au-dessous des rails.

Les aqueducs latéraux sont devenus une exception et on leur préfère un seul aqueduc placé au centre du tunnel, par les raisons suivantes :

Deux aqueducs latéraux coûtent plus cher qu'un aqueduc central unique ; ils obligent à descendre plus bas les fondations des pieds-droits, d'où un surcroît de dépenses; la plate-forme se trouve mal assainie au milieu du tunnel, précisément au point où il importe le plus pour la stabilité de la voie qu'elle n'éprouve aucun mouvement.

Si des fuites d'eau se produisent dans un aqueduc latéral, les maçonneries peuvent être altérées ; le terrain peut également être ramolli et causer ainsi des mouvements dans les maçonneries et les voies.

Voici à ce sujet un fait intéressant, consigné en 1849 dans le *Journal des Chemins de fer*, de Stuttgard, dirigé par l'ingénieur Etzel. Il s'agit du tunnel de la Prag, situé près de Stuttgard. Ce souterrain, qui a 900 mètres de long, est percé dans le terrain Keuperien qui était très aquifère. On a d'abord établi deux aqueducs latéraux, mais les eaux pénétrèrent dans la plate-forme et la ramollirent, au point qu'on fut obligé d'éta-

blir après coup, au milieu même du tunnel, un troisième aqueduc ayant 0m30 de large sur 0m45 de haut; le radier en était placé au niveau des fondations des pieds-droits. Cet aqueduc eut pour effet d'assainir complètement la plate-forme et de lui rendre la stabilité qu'elle avait perdue.

On donne ordinairement à l'aqueduc central 0m30 de large et 0m30 de haut, et on le couvre avec des dalles posées à sec, pour en faciliter l'entretien. Son radier doit être placé à une profondeur telle que les eaux ne puissent déborder sur la plate-forme. Une profondeur de 0m20 à 0m30 suffit généralement pour ce but, ce qui place ce radier à 0m90 ou 1 mètre au-dessous du rail.

Le tableau suivant donne les dimensions des aqueducs établis dans les grands tunnels que nous avons cités précédemment.

DÉSIGNATION DES TUNNELS	AQUEDUCS				
	Largeur intérieure.	Hauteur intérieure.	Profondeur du radier sous le rail.	Couverture.	
	mètres	mètres	mètres		
Credo	0 50	0 40	1.20	dalles.	
Hauenstein	0 45	0 45	0 90	id.	
Mont-Cenis	0 60 0 90	0 40 0 70 1 »	1 » 1.20 1.40	dalles et voûtes	
St-Gothard tête nord	40 à 60 c.	0 40	1.20	dalles.	
St-Gothard tête sud	0 90	0 65	1.45	voûtes	
Arlberg	60c à 1m	0 80	1.50	dalles.	
Simplon (projet 1882)	60c à 1m	0 80	1.50	dalles.	
Nerthe	1.40	0 70	1.40	voûte.	
Blaizy	0 60	1.10	1.50	voûte.	

Les aqueducs voûtés ont cet inconvénient qu'il faut leur donner de grandes dimensions pour en permettre

la visite. Ils exigent 1 mètre cube de maçonnerie et 1 1/2 mètre cube de déblais environ, d'où une dépense de près de 100 fr. par mètre courant, tandis que l'aqueduc dallé du Hauenstein n'a coûté que 25 fr.

Au lieu de construire les aqueducs en pierres taillées sur toutes leurs faces, il serait préférable de les exécuter en béton, ce qui diminuerait l'importance des fouilles et des maçonneries.

Plate-forme des Tunnels. — Dans les terrains secs la plate-forme d'un tunnel peut sans inconvénient être réglée suivant une surface de niveau, mais lorsque des sources ou des filtrations se font jour sur quelques points il faut nécessairement les diriger dans un aqueduc et éviter que leurs eaux ne séjournent sur la plate-forme, surtout lorsqu'elle est composée d'argile, de sable, de schiste, de marne, etc., etc.

Pour parer à cet inconvénient on recouvre quelquefois la plate-forme d'un radier en maçonnerie, mais le plus souvent on se contente d'appliquer une couche de béton, comme au tunnel de Blaizy percé dans les marnes du Lias et les marnes irisées, et où la couche de béton a une épaisseur de 0^m10.

En général, on donne à la plate-forme une pente transversale assez forte pour assurer l'écoulement rapide des eaux vers l'aqueduc. Cette pente varie beaucoup suivant les circonstances et l'appréciation des ingénieurs; ainsi, sur la ligne de Paris à Lyon et sur celle de Lyon à Genève, la pente est de 10 %, tandis qu'au Saint-Gothard on n'a donné que 2 1/2 %, ce qui est relativement faible et ne peut être accepté

que dans des terrains solides et inaltérables sous l'action de l'eau.

La pente généralement usitée est de 5 %, c'est celle qui existe au Hauenstein et à l'Arlberg.

2° FRAIS D'EXCAVATION

Lorsque les dimensions d'un tunnel ont été fixées, la première chose à rechercher pour savoir ce qu'il coûtera, c'est le prix à payer pour en faire l'excavation. Ce prix varie beaucoup suivant la nature du terrain. Les nombreux exemples que nous avons cités dans les tableaux (pages 168 à 192) comprenant 379 tunnels à deux voies, permettent de fixer les idées à cet égard et peuvent se résumer comme suit :

NATURE DES TERRAINS	NOMBRE de Tunnels	PRIX MOYEN d'excavation du mètre cube	PRIX MOYEN du mètre courant de Tunnel tout compris	PRIX minimum et maximum du MÈTRE COURANT
		FR.	FR.	FR.
Granit, gneiss	56	20 à 25	1.642	do 1.008 à 3.122
Schistes, grès	39	9 à 10	1.237	707 à 1.659
Trias.....	3	.....	1.490	1.440 à 1.531
Jurassique.....	69	8 à 9	1.278	578 à 2.578
Crétacé (bassin parisien).....	34	4 à 5	978	449 à 1.518
Tertiaires et modernes.....	39	2 à 4	1.738	895 à 3.089

Les prix indiqués pour le mètre cube d'excavation sont relatifs à des tunnels de faible longueur et com-

prennent seulement la fouille, charge, transport en galerie et éclairage. Ils ne comprennent pas les boisages, qui, dans les terrains tendres, augmentent beaucoup la dépense et souvent même en doublent l'importance.

Les prix qui nous intéressent surtout en vue des tunnels de la Gemmi et du Simplon, sont ceux relatifs aux terrains cristallins et aux terrains jurassiques.

Terrains cristallins. — Pour les terrains cristallins (granit, gneiss, etc., etc.), on a vu que dans les nombreux tunnels cités, le prix d'excavation est généralement inférieur et rarement supérieur à 25 fr. le mètre cube. Ce chiffre est celui qui a été accepté par les entrepreneurs de l'Arlberg, qui recevaient 1,365 fr. pour une section de 57 mètres carrés.

Pour le Saint-Gothard, l'entreprise Louis Favre avait un prix bien supérieur, puisqu'elle recevait 2,800 fr. par mètre courant cubant 45 mètres, soit 62 fr. par mètre cube; mais pour comparer plus exactement ce prix avec les précédents on doit en déduire les frais d'installations mécaniques, qu'il comprend implicitement, ainsi que le coefficient de dépense relatif à la longueur du tunnel, soit au total environ 800 fr. par mètre courant, comme nous l'expliquerons plus tard. Il reste donc 2,000 fr. qui, divisés par 45 mètres, donnent 44 fr. Ce prix comparé à celui de 25 fr. que nous avons établi comme normal et suffisant est, comme on le voit, fort exagéré et trop élevé de 80 %. Cette observation est d'ailleurs pleinement confirmée par le tableau de la page 192, qui donne le prix de revient des nombreux tunnels percés sur les lignes d'accès du

Saint-Gothard et qui, exécutés dans des roches cristallines, n'ont pas coûté en moyenne plus de 22 fr. par mètre cube pour excavation, quoiqu'ils n'aient été exécutés que pour une voie, ou partiellement pour deux voies.

Terrains jurassiques. — Pour le tunnel de la Gemmi, c'est le prix d'excavation dans les terrains jurassiques, que nous devons considérer. Ce prix est de 8 à 9 fr. seulement, soit le tiers environ de celui des granits. Nous devons cependant rappeler qu'au tunnel du Hauenstein, l'excavation seule est revenue à une douzaine de francs ; mais c'est là un prix exceptionnel pour un souterrain jurassique, et ce qui le démontre clairement, c'est que le Bœtzberg, percé à quelques kilom. de distance dans le même terrain, ayant la même longueur et une seule pente, n'a coûté que 1,450 fr. le mètre courant, soit 24 % de moins que le Hauenstein, dont le prix s'est élevé à 1,900 fr. par suite de difficultés graves et imprévues.

L'excavation au Bœtzberg n'a donc pas dû coûter plus de 8 francs. On trouve à ce sujet, dans l'ouvrage sur les tunnels publié à New-York, en 1878, par M. Drinker, quelques renseignements fournis par M. l'ingénieur Kauffmann, qui a dirigé les travaux de ce tunnel. Il en résulte que, la galerie d'avancement cubant 6 mètres cubes par mètre courant, coûtait, savoir : dans le calcaire très dur, 130 fr., — dans la molasse et les marnes du lias, 90 fr. — L'abattage en grand coûtait 250 à 290 fr. le mètre courant.

L'excavation du Bœtzberg a donc coûté en moyenne environ 100 fr. le mètre courant, soit, pour un cube

supposé de 53 mètres, un prix de 7 fr. 50 par mètre cube.

Il convient de remarquer qu'au Bœtzberg, contrairement à ce qui avait eu lieu au Hauenstein, on n'a trouvé que très peu d'eau pendant l'exécution des travaux.

On a vu page 32 qu'au tunnel des Loges, le prix payé dans la roche calcaire pour une section de 20 1/2 mètres carrés seulement, avait été de 12 fr. 70 par mètre cube, somme équivalant à 9 fr. 60 pour un tunnel à deux voies, mesurant 15 mètres carrés (1). Ce chiffre de 9 fr. 60 se réduirait facilement à 8 fr., si le terrain était composé en partie de rocher et en partie de marne.

Neuf tunnels ont été ouverts à une seule voie, le long du lac des Quatre-Cantons, dans les terrains jurassiques et crétacés. Ils ont ensemble une longueur de 5,288^{m}50 et leur excavation a coûté de 12 fr. 80 à 16 fr. 30 et en moyenne 15 fr. 25 par mètre cube. Le prix minimum (12 fr. 80) qui est identique à celui du tunnel des Loges, s'applique à un petit souterrain de 138 mètres de long. Le prix moyen (15 fr. 25) s'explique en partie par la grande longueur de trois des tunnels qui ont respectivement 988, 1,119 et 1,941 mètres.

Au tunnel de la Nerthe, l'excavation a coûté 11 fr. par mètre cube, mais si on tient compte du transport par les puits, ce prix se réduit à 8 francs.

Prix des Tunnels déjà exécutés dans les Alpes. Pour compléter cette étude, nous avons résumé dans le tableau suivant les renseignements

(1) A la page 32, on a indiqué par erreur 8 fr. au lieu de 9 fr. 60.

que nous avons pu recueillir sur les prix d'excavation des divers tunnels déjà exécutés dans les Alpes. Les prix indiqués pour la galerie d'avancement, comme ceux relatifs à la section entière des tunnels, comprennent implicitement toutes les dépenses relatives aux installations mécaniques, ainsi que celles résultant de la longueur des tunnels, des frais d'aérage, épuisement, etc., etc.

Numéros d'ordre	DÉSIGNATION DES TUNNELS	PAR MÈTRE CUBE			Par MÈTRE courant
		Galerie d'avancement	Abattage	Ensemble	
	Mont-Cenis				
1	Percement à la main.....	38f 20	.....	.....	.....
2	Percement à la machine.....	94 50			
3	Prolongement du Mont-Cenis....	45 »	16f »	20f »	1.100f
	Saint-Gothard				
4	Grand tunnel	116 »	53 »	62 »	2.800
5	Tunnel hélicoïdal de Wattingen.	32 33	14 44	16 40	941
6	Tunnel hélicoïdal de Leggistein..	37 05	15 04	17 90	1.029
7	43 tunnels des lignes d'accès (moyenne)	.....	.....	20.45	876
8	Tunnels du lac des Quatre-Cantons, percés dans un calcaire appartenant à l'étage crétacé.....	.....	.....	15 25	.....
	Arlberg				
9	Le premier kilomètre.....	103 »	20 80	30 00	1.877
10	Kilomètre moyen	108 »	22 80	32 50	2.034

Voici comment ont été établis les chiffres de ce tableau :

Tunnels nos 1 et 2. — Les prix indiqués pour la galerie d'avancement sont empruntés à un Mémoire inséré, par M. l'ingénieur A. Pernolet, dans les

supposé de 53 mètres, un p[illegible] *l'Industrie minérale*, cube. [illegible]ipant à une galerie cu-

Il convient de remarquer [illegible] M. Pernolet n'en donne rement à ce qui avait eu l[illegible]ement que la consommation trouvé que très peu d'eau : 3[illegible] par mètre cube avec travaux.

On a vu page 32 qu'au [illegible] payé dans la roche calcaire [illegible] prolongement du Mont- mètres carrés seulement, [illegible]mprend l'amortissement mètre cube, somme équi[illegible] (système Ferroux) qui tunnel à deux voies, mes[illegible]. L'entrepreneur était Ce chiffre de 9 fr. 60 se r[illegible] environ le mètre cou- si le terrain était compo[illegible] partie de marne.

Neuf tunnels ont été ou[illegible] Gothard la galerie d'a- du lac des Quatre-Cant[illegible] M. Deharme 200 francs siques et crétacés. Ils on[illegible] frais ni les transports, soit 5,288m50 et leur excava[illegible] la somme de 200 fr. 16 fr. 30 et en moyenne [illegible] francs. (*Revue géné-* prix minimum (12 fr. 80[illegible] tembre 1880.) tunnel des Loges, s'app[illegible] en prix de 42 fr. 20 138 mètres de long. Le [illegible] d'avancement et l'ac- que en partie par la gra[illegible] suivants : le mètre cou- nels qui ont respectivem[illegible] 20, soit 42 fr. 20 le mètre

Au tunnel de la Ner[illegible] souterraine et enlève- par mètre cube, mais s[illegible] dynamite, 152 francs ; pro- par les puits, ce prix se[illegible] francs ; entretien des [illegible] francs. On consommait [illegible] mètre cube. Les ouvriers

Prix des Tunnels [illegible] Alpes. — Pour compl[illegible] l'ouvrage déjà cité résumé dans le table[illegible] suivants fournis

(1) A la page 32, on a indiq[illegible]

uffmann, ancien inspecteur des
lard : la galerie d'avancement
arrés et coûtait 230 francs le
venant : main-d'œuvre de perfo-
ransport, 50 francs; — dynamite,
s, éclairage, réparation d'outils,
es chiffres, le mètre cube revenait
battage en grand coûtait 20 francs
francs dans le granit.
ancs qui figure au tableau est com-
0 ci-dessus, auxquels on a ajouté
ortissement et les intérêts des ins-
ues. Pour calculer ce chiffre de
mis que les installations mécaniques
illions de francs auxquels on a ajouté
% pendant 8 ans, soit 2,000,000 de
ainsi 7,000,000 qui, répartis sur
ourant de tunnel, font 467 francs ou
mètre cube de galerie d'avancement,
elle-ci mesurait 2^m50 sur 2^m50, soit
courant (1).
2 francs résulte, comme on l'a déjà dit,
de 2,800 francs, prix à forfait du mètre
cube du tunnel dans œuvre, soit 45 mè-

émoire qu'il a publié en 1882 au sujet du
l'ingénieur Meyer calcule le prix moyen du
l'excavation en divisant 2,800 francs par le
du tunnel, y compris la maçonnerie, soit

el, dans sa brochure du mois d'octobre 1882, admet
re de 5 millions comme prix des installations du
el.

58m25 et trouve ainsi 48 francs au lieu de 62 francs. Il y a ici une erreur d'interprétation du marché Louis Favre, car M. le professeur Gerlisch, ancien ingénieur du Saint-Gothard, a publié en 1883, dans la *Revue Polytechnique*, de Zurich, un article relatif au Simplon, dans lequel il dit expressément que les prix de maçonnerie au Saint-Gothard *comprennent l'excavation de l'espace nécessaire à l'exécution du revêtement*. (Voir la traduction de cet article dans le bulletin des ingénieurs et architectes vaudois, année 1883, page 25.)

Tous les chiffres inscrits dans le tableau précédent prouvent avec évidence combien le prix de 62 francs payé à l'entreprise L. Favre était exagéré.

Tunnels nos 5 et 6. — Les deux tunnels hélicoïdaux de Wattingen et de Leggistein situés sur la ligne d'accès au nord du Saint-Gothard sont à double voie partielle et percés dans le gneiss. Le premier avait 1,083 mètres et le second 1,089 mètres de long. La galerie d'avancement avait 2m40 sur 2m40 et mesurait 6m12 carrés. L'abattage mesurait 51m38 carrés. L'ensemble de l'excavation mesurait donc 57 ½ mètres cubes par mètre courant.

L'avancement à la main était en 1876 de 0m65 par jour. Plus tard en 1880, avec la perforation mécanique, on a obtenu 1 mètre à 1m20 d'avancement par jour dans une roche très dure.

Les prix indiqués au tableau sont ceux correspondant au percement à la main de la galerie d'avancement.

Les chiffres que nous venons de donner sont ex-

traits du rapport fédéral du 30 juin 1876. Ils diffèrent de ceux de la page 195 qui sont empruntés au mémoire du département fédéral des chemins de fer de 1886-87. Ces derniers chiffres correspondent sans doute au décompte définitif des travaux, tandis que les premiers sont relatifs à des observations faites en cours d'exécution.

Tunnel n° 7. — Le prix maximum d'excavation par mètre cube, dans les 43 tunnels considérés, a été de 26 fr. 60. (Voir le tableau page 192.)

Tunnel de l'Arlberg n^os 9 et 10. — Les chiffres inscrits à ces deux numéros correspondent aux colonnes 3 et 4 du tableau de la page 134.

Le prix de 103 fr. par mètre cube pour la galerie d'avancement a été calculé en prenant le prix du marché, soit 45 fr., auquel on a ajouté 58 fr. représentant les dépenses faites pour les installations mécaniques y compris les intérêts pendant la construction. Ces dépenses spéciales entrent pour 6 fr. 50 dans le chiffre de 30 francs qui figure au tableau comme prix moyen total du mètre cube d'excavation; elles augmentent donc de 28 °/₀ les dépenses ordinaires d'excavation, mais elles ne sont que le 15 °/₀ de la dépense totale de construction du tunnel.

Le prix de l'abattage 20 fr. 80 a été calculé en retranchant du prix par mètre courant 1,877 francs, la valeur de la galerie d'avancement, soit 103 fr $\times$ 7^{m} = 721 francs et divisant le reste, 1,156 fr. par 55 1/2 mètres cubes.

La différence entre le prix de 18 fr. 50 indiqué page 132 et celui de 20 fr. 80 figurant au tableau ci-

[illegible] de ce que le premier ne comprend [illegible] dernier la petite galerie de calotte [illegible] et payée 210 francs le mètre courant ou [illegible] mètre cube.

3e PRIX DES MAÇONNERIES

[illegible] les maçonneries varie beaucoup d'un pays [illegible] dans un même pays, suivant la proximité [illegible], leur nature ou qualité et les préparations [illegible] leur fait subir. Ce n'est donc que par une [illegible] spéciale qu'on peut déterminer ce prix pour [illegible] souterrain à construire.

[illegible] le renseignement, voici un certain nombre [illegible] qui sont de nature à intéresser les constructeurs [illegible] tunnels.

[illegible] chiffres consignés dans les tableaux, pages 168 [illegible] fournissent les prix suivants pour la maçonnerie [illegible] divers terrains :

NATURE DES TERRAINS	PRIX DU MÈTRE CUBE DE MAÇONNERIE		
	Minimum	Maximum	Moyen
	fr.	fr.	fr.
[illegible] grès	20	23	21
[illegible]	23	30	27
[illegible]	27	31	29
[illegible]	25	40	32

La maçonnerie de briques employée dans quelques tunnels a coûté de 50 à 60 francs le mètre cube.

Le tableau suivant donne les prix payés dans la traversée du Saint-Gothard :

NATURE DES MAÇONNERIES	PRIX SUIVANT LES SECTIONS				MOYENNE de l'ensemble
	IMMENSÉE ERSTFELD — Longueur : 41.329m	ERSTFELD Goeschenen — Longueur : 29.451m	AIROLO BIASCA — Longueur : 45.847m	GIUBIASCO LUGANO — Longueur : 25.942m	
	FR.	FR.	FR.	FR.	FR.
Pierres sèches	7 à 10	8 à 12	10 à 13	.....	
Moellons bruts	16 a 20	18 a 21	19 à 23	15 à 16	
id. tetués	17 à 24	21 à 25	23 à 27	18	
id. smillés	33 a 36	42 à 47	37 à 48	.....	
id. assisés	37 a 48	48 à 60	47 à 60	44 à 48	
Pierres de taille	83 à 107	93 a 104	89 à 112	84 à 88	
Murs, minimum, maximum et moyens	21 à 32 / 18.90	..... / 21	10 à 24 / 15.75	14 à 16 / 15.85	18.25
Ponts et ponceaux, minimum, maximum et moyens	23 à 29 / 23.25	27 à 30 / 28.40	27 à 32 / 30.10	21 à 24 / 23.10	26.80
Tunnels, minimum, maximum et moyens	33 à 35 / 33.50	40 à 43 / 41.30	39 à 46 / 43.30	27 à 29 / 28.07	38.25

Sur le lac des Quatre-Cantons les prix dans les tunnels ont varié de 31 à 39 francs.

Au grand tunnel du Saint-Gothard, le prix moyen prévu par L. Favre était de 77 fr. 50, mais pour avoir le prix correspondant au premier kilomètre, il faut diminuer ce prix d'abord de 15 % correspondant au coefficient de longueur, ce qui le réduit à 67 francs, puis le diminuer encore de 17 francs environ pour tenir compte de l'excavation du rocher comprise dans le prix de 77 fr. 50. On obtient ainsi 50 francs comme chiffre comparable aux précédents.

On a vu qu'au tunnel des Loges, le prix de maçonnerie était également de 50 francs, mais pour les petits tunnels du Jura industriel on n'a payé que 32 francs.

Au Hauenstein, la maçonnerie a coûté 60 francs. Ce prix très élevé s'explique en partie par la faible épaisseur des revêtements qui étaient surtout composés de petites pierres de taille en calcaire coûtant 32 francs le mètre cube rendues sur les chantiers. Ce prix comprend aussi 2 francs pour les remplissages à sec derrière les maçonneries et 10 francs pour les transports effectués en souterrain.

Dans le petit tunnel de Läufelfingen, situé à un kilomètre du Hauenstein, on n'a payé que 48 francs pour les maçonneries de voûte et 40 francs pour celles des pieds-droits.

Dans les Pyrénées, on a payé également 60 francs au grand tunnel de Oazurza et 45 francs dans les petits tunnels. Le haut prix du sable et de la chaux, ainsi que la difficulté des transports, justifiaient ces prix élevés.

Prix de l'Arlberg. — Sur les lignes d'accès de l'Arlberg on a payé, en moyenne, par mètre cube : pour les murs de soutènement, 17 fr. 50; pour les voûtes, 20 à 22 francs; et pour les maçonneries en pierres de taille, 51 à 74 francs.

On a vu que pour le grand tunnel le prix relatif au premier kilomètre était de 44 fr. 50.

Un mémoire publié en novembre 1888, dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, fournit les renseignements suivants sur les maçonneries exécutées dans ce tunnel.

Dans la partie *Est* la maçonnerie était exécutée avec des moellons de gneiss, et les vides en dehors des types étaient remplis de pierres sèches.

Dans la partie *Ouest*, on a employé comme moellons pour la maçonnerie non seulement le gneiss, mais encore le calcaire et le verrucano. Les vides ont été remplis avec de la maçonnerie à mortier sur 30 °/₀ de la longueur du tunnel. Sur 7 °/₀ de sa longueur la voûte et une partie des pieds-droits sont construits en pierres de taille. Enfin, sur 11 °/₀ de la longueur, le mortier a été fait avec du ciment de Portland.

Dix anneaux ont dû être réparés par suite des déformations qu'ils avaient subies sous l'action de la pression du terrain. Pour diminuer cette pression, on a assaini le terrain en ouvrant vingt galeries transversales, mesurant chacune 18 mètres de long en moyenne.

4° INFLUENCE DE LA LONGUEUR DES SOUTERRAINS ET DE LA VITESSE D'EXÉCUTION SUR LEUR PRIX DE CONSTRUCTION.

Petits tunnels. — Lorsqu'il s'agit de petits tunnels ayant seulement quelques centaines de mètres de long, on en détermine facilement le prix si l'on connaît la nature du terrain et le coût des maçonneries. Tant que la longueur de ces tunnels ne dépasse pas 1,000 mètres, par exemple, la dépense varie peu dans un même terrain, car on se contente généralement de les attaquer par les deux têtes, et ce n'est qu'en cas de grande urgence ou lorsque le terrain à une faible

épaisseur au-dessus de la galerie, qu'on ouvre des puits dans le but de hâter l'achèvement de l'ouvrage. On peut donc, en principe, considérer tous les tunnels ayant une longueur maximum de un kilomètre comme formant un premier groupe de travaux dont l'exécution est courante.

Emploi des puits. — Au delà de 1,000 mètres, l'attaque d'un souterrain par ses deux extrémités seulement exigerait beaucoup de temps, et pourrait retarder l'ouverture à l'exploitation de toute une ligne de chemin de fer; aussi a-t-on toujours cherché à activer le percement de ces ouvrages en ouvrant sur leur longueur un certain nombre de puits qui permettent de multiplier les points d'attaque. Cette solution n'est d'ailleurs possible que lorsque l'épaisseur du terrain au-dessus de la galerie ne dépasse pas 200 à 300 mètres. Car si cette épaisseur est plus forte, l'exécution des puits nécessite beaucoup de temps et de dépenses. C'est pour ces cas exceptionnels qu'on a imaginé la perforation mécanique qui permet une exécution rapide des tunnels même en ne les attaquant que par leurs deux extrémités.

L'emploi des puits, en réduisant le délai d'exécution, diminue sans doute dans une certaine mesure les dépenses résultant de l'intérêt des capitaux engagés, mais cette solution est assez coûteuse, car elle augmente d'environ 500 francs en moyenne le prix du mètre courant de souterrain : cette somme comprend essentiellement le prix des puits, celui du matériel spécial (manège, machine à vapeur, etc.), et enfin les frais de transports des matériaux par les puits, frais

qui sont généralement de 3 francs plus élevés que par les galeries aboutissant aux têtes du tunnel.

Le tableau suivant permettra d'apprécier l'importance de ces divers éléments de dépenses :

NUMÉROS D'ORDRE	DÉSIGNATION DES TUNNELS	LONGUEURS	PUITS				
			Profondeur maximum	Profondeur moyenne	Longueur par kilomètre de tunnel	Espacement maximum	mè
	1° TUNNELS A DEUX VOIES	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	f
1	Credo près Genève.....	3.947	216	149	226	700	
2	Hauenstein.....	2.496	195	160	193	510	
3	La Nerthe.....	4.639	190	100	521	220	
4	Blaizy.....	4.100	200	123	600	200	
5	Oazurza.....	2.955	241	122	474	678	
6	Saint-Martin-d'Estréaux.	1.380	53	33	240	140	
7	Rilly.....	3.450	112	68	200	300	
8	Lamotte.....	2.528	58	42	168	300	
9	Vierzy.....	1.400	45,5	40	300	112	
10	Saint-Cloud.....	504	35	30	504	50	
11	Breval.....	796	30.60	26	320	150	
12	Boubard.....	585	30	25	170	100	
	2° TUNNELS A UNE VOIE						
13	Les Loges.....	3.259	226	165	304	598	
14	Lioran.....	1.958	29	22	90	500	

...ES SPÉCIALES PAR MÈTRE COURANT DE TUNNEL POUR					DÉPENSES spéciales par mètre cube d'excavation de tunnel	COUT TOTAL du mètre courant de tunnel	DURÉE des Travaux
...ons ...ées	Transport par les Puits	Epuisements Aérage	Matériel capital et intérêts	TOTAL			
...es	francs	francs	francs	francs	francs	francs	mois
•	...	...	...	...	....	1.640	48
1	110		115	306	5 60	1.900	60
0	230		120	530	7 50	2.256	40
0	140		120	440	6 30	2.195	60
0	100		200	760	14 »	2.500	69
0	240	53	72	585	11 50	2.371	54
17	54	...	43	214	4 »	735	40
15	58	117	60	280	5 »	997	30
..	...	...	...	...	....	1.261	..
08	50	80	50	488	7 »	2.180	15
05	50	108	50	313	4 50	2.867	33
02	50	51	51	254	4 »	2.157	24
80	48	7	47	182	7 60	700	46
137	171		92	400	11 40	1.308	38

On voit par ce tableau que les dépenses spéciales ont varié de 214 à 760 francs par mètre courant et sont en moyenne d'environ 500 francs. Tels sont les frais qu'il faut généralement ajouter au prix du mètre courant des petits tunnels, pour en déduire celui des grands tunnels exécutés au moyen de puits.

Grands tunnels des Alpes. — Voyons maintenant ce que coûtent les tunnels d'une longueur exceptionnelle, lorsqu'on les exécute par les deux têtes seulement et au moyen de machines perforatrices. Les difficultés qu'on rencontre dans ce cas résultent soit de la longueur même du souterrain, soit de la vitesse d'exécution qu'on veut imprimer aux travaux.

1° **Dépenses résultant de la longueur des souterrains.** — Nous avons déjà indiqué (pages 64, 133 et 136), que les ingénieurs italiens et autrichiens avaient cherché à se rendre compte de l'augmentation de dépenses résultant spécialement de l'allongement des souterrains.

Les ingénieurs italiens ont trouvé que cette augmentation était de 70 francs par mètre courant dans chaque kilomètre au-delà du premier en partant des têtes. Ce chiffre représente essentiellement l'augmentation des frais de transport et d'aérage.

A l'Arlberg, d'après les calculs que nous avons faits, l'augmentation admise par les ingénieurs autrichiens serait de 110 francs. Nous pouvons donc adopter 100 francs en chiffres ronds.

Il en résulte que si on appelle L la longueur en kilomètres d'un souterrain à construire et p le prix du mètre courant du premier kilomètre (c'est-à-dire celui

d'un tunnel de faible longueur), ce prix p devra être augmenté de 100 francs pour le second kilomètre, de 200 francs pour le troisième kilomètre et ainsi de suite, ce qui s'exprime par la formule :

$$\frac{100\left(\frac{L}{2}-1\right)}{2} = (L-2)\,25$$

2° Dépenses résultant de la vitesse d'exécution. — Pour activer la construction d'un tunnel, il suffit de hâter le percement d'une première galerie de service qui, après son ouverture, permet de multiplier les points d'attaque pour l'abattage en grand et l'exécution des maçonneries. Ces derniers travaux s'exécutent généralement à la main et suivant les procédés usuels ; les dépenses qu'ils nécessitent sont donc analogues à celles des tunnels ordinaires.

Tous les frais exceptionnels concernent ainsi la perforation de la galerie d'avancement. Or, on sait que les dépenses en poudre et main-d'œuvre avec les perforatrices sont sensiblement égales à celles qu'exige le percement à la main. L'augmentation de dépenses résultant de la perforation mécanique ne comprend donc que les installations nécessaires pour produire et transmettre la force aux perforatrices et pour aérer les chantiers.

Installations mécaniques. — L'expérience des trois tunnels construits dans les Alpes a fait connaître d'une manière assez exacte le prix de ces installations ; on a vu, en effet :

1° Qu'au Mont-Cenis (page 71), ces dépenses avaient été, suivant M. Grattoni, de 4,222,000 francs, et d'après M. Noblemaire, de 3,481,200 francs. Observons

d'ailleurs que le premier chiffre est trop élevé, car il comprend les wagons, les voies et les matières en magasin.

2° Au Saint-Gothard (page 111), la dépense a été de 3,777,027 francs, chiffre auquel il convient d'ajouter une partie des frais relatifs aux terrains et immeubles, qui s'élèvent à 1,161,546 francs.

3° Enfin, à l'Arlberg (page 137), les dépenses faites par le gouvernement autrichien pour les installations mécaniques ont été de 3,509,100 francs, mais cette somme comprend des chemins, des maisons d'habitation, des magasins, etc., qui ne font pas partie de ces installations.

Tout compte fait, j'estime que les installations mécaniques peuvent, en général, être évaluées comme suit :

a) Une somme constante et égale à 2,500,000 francs.

b) Une somme complémentaire de 100,000 francs à ajouter à la précédente pour chaque kilomètre de tunnel à construire ; ce dernier chiffre a pour but de faire face à l'allongement des conduites d'eau et d'air et à l'augmentation de force qui en est la conséquence.

D'après ces hypothèses, les installations mécaniques coûteraient :

Pour un tunnel de 10 kilomètres, 3,500,000 francs.
Pour un tunnel de 15 kilomètres, 4,000,000 francs.
Pour un tunnel de 20 kilomètres, 4,500,000 francs.
Enfin, pour un tunnel de longueur L, 2,500,000 fr., + 100,000 L.

Telle est la dépense spéciale qui, augmentée des intérêts à 4 °/₀ pendant la durée des travaux, doit être amortie et portée au compte de la *vitesse d'exécution*. Il faudrait y ajouter les frais d'entretien de ces instal-

lations, mais leur valeur ne nous est pas connue ; elle doit d'ailleurs être relativement peu importante.

Si, d'autre part, nous supposons que la galerie de direction avance de 1000 mètres par an à chaque tête (soit de 2000 mètres en tout pour les deux têtes) la durée des travaux sera de $\frac{L}{2}$ années.

D'après ces données, les installations mécaniques avec l'intérêt à 4 % représenteront par mètre courant de tunnel une dépense de $\frac{(2{,}500 + 100\ L)\ (1 + 0{,}02\ L)}{L}$

Si nous représentons par P le prix du mètre courant d'un tunnel ayant une longueur de L kilomètres, ce prix, avec les éléments ci-dessus, sera égal à $p + (L-2)\ 25 + \frac{(2{,}500 + 100\ L)\ (1 + 0{,}02\ L)}{L} = P$, d'où l'on déduit $27\ L^2 + (100 + p - P)\ L + 2{,}500 = o$.

Cette équation est celle d'une hyperbole qui fournit la relation entre la longueur d'un tunnel et son prix de construction.

Le tableau suivant donne les valeurs des deux quantités (P-p) et L pour quelques cas particuliers :

LONGUEUR du TUNNEL	VALEUR DE		VALEUR P-p
	(L-2) 25	$\frac{(2{,}500 + 100\ L)\ (1 + 0{,}02L)}{L}$	
kilomètres	francs	francs	francs
1	— 25	2.652	2.627
2	0	1.404	1.404
5	75	660	735
10	200	420	**620**
20	450	315	765
35	802	**291**	1.093
50	1.200	300	1.500
100	2.450	375	2.825

La dépense totale minimum serait de 620 fr. et correspondrait à une longueur de souterrain de 10 kilomètres (soit plus exactement 619 f. 60 pour une longueur de 9,600 mètres).

La conclusion qu'on pourrait déduire de ces chiffres c'est qu'un tunnel coûterait plus cher avec la perforation mécanique qu'avec des puits, pourvu toutefois que la profondeur de ceux-ci ne dépasse pas 200 à 300 mètres.

Les données adoptées comme base dans nos calculs pourront varier suivant les circonstances et les appréciations particulières à chaque constructeur, mais la méthode suivie nous paraît assez générale pour permettre de résoudre toutes les questions de cette nature. Il importe d'ailleurs de rappeler que ces calculs supposent l'existence à chaque tête de tunnel d'une force hydraulique suffisante et gratuite, comme cela a eu lieu pour les trois tunnels déjà construits dans les Alpes. Si l'on devait employer des machines à vapeur, les frais seraient évidemment beaucoup plus considérables.

Il nous reste à faire l'application des résultats obtenus, aux deux tunnels projetés à travers la Gemmi et le Simplon.

X

TRAVERSÉE DE LA GEMMI. — FRAIS DE CONSTRUCTION

Pour la traversée de la Gemmi, nous adoptons comme tracé celui que nous avons appelé *solution intermédiaire* (page 16) et qui donne au tunnel une longueur de 21 1/2 kilomètres.

Nous rappellerons :

1° Que le tracé comprend entre Thoune et Mittholz une section à ciel ouvert de 28 kilomètres de long, estimée précédemment 200,000 francs le kilomètre, soit en tout 5,600,000 francs;

2° Que la hauteur maximum du terrain au-dessus du tunnel ne dépasse guère 1,400 mètres, et qu'il n'y a par conséquent pas lieu de redouter des températures excessives qui pourraient gêner le travail et en augmenter le prix;

3° Que le tunnel de la Gemmi est en terrain jurassique et que l'évaluation doit être faite non pas d'après les prix payés dans les tunnels du Saint-Gothard et de l'Arlberg, mais d'après ceux des tunnels du Jura, tels que le Hauenstein et les Loges.

4° Que le raccordement de la tête Sud du tunnel avec le chemin de fer du Valais à Turtmann exigera la construction d'une voie ferrée de 8 kilomètres de long.

1° TERRAINS ET EAUX

Terrains. — En étudiant la carte géologique de la Suisse dressée par MM. Studer et Escher, on remarque que le versant nord de la vallée du Valais, depuis Saint-Maurice jusqu'à Louèche, est composé de terrains jurassiques dont les affleurements au jour forment une bande de 12 kilomètres de large environ et suivent une direction parallèle au Rhône. Mais, à Louèche, on se rapproche des gneiss qui apparaissent à 6 kilomètres à l'est des Bains ; il en résulte que les affleurements jurassiques sont brusquement rejetés vers le nord et forment le col de la Gemmi ainsi que la vallée de la Kander. Le massif du lias qui constitue la base de l'étage jurassique apparaît d'ailleurs sur la rive gauche de la Dala entre les Bains et Inden sur une largeur de 3 à 4 kilomètres.

Le tunnel de la Gemmi, quoique placé au centre des Alpes, sera donc un *tunnel jurassique* et présentera des conditions plus favorables que les tunnels voisins du Saint-Gothard et du Simplon, percés dans des roches très dures, telles que les gneiss et les micaschistes. Il ne faut pas en conclure cependant que dans toute son étendue ce tunnel ne rencontrera que

des calcaires faciles à excaver et assez résistants pour n'exiger qu'un faible muraillement. Remarquons en effet que ce souterrain sera dans sa partie centrale à une profondeur variant de 1,000 à 1,500 mètres au-dessous du col de la Gemmi, et qu'à cette profondeur le terrain pourra différer notablement des couches supérieures. Une étude géologique sérieuse pourra seule faire connaître ou tout au moins faire prévoir les terrains qu'on trouvera en exécution. Il ne paraît pas impossible, du reste, que le calcaire descende jusqu'au niveau du tunnel si ses bancs sont suffisamment inclinés.

Le terrain jurassique repose-t-il directement sur le gneiss et celui-ci atteindra-t-il le niveau du tunnel ou bien trouvera-t-on entre ces deux terrains quelques lambeaux du trias d'où sortent les sources des Bains. C'est ce qu'il conviendra de rechercher avec soin en faisant au besoin des sondages.

Quoi qu'il en soit de la nature des terrains existants sous la Gemmi même, la rencontre d'un calcaire compacte sur une grande partie du tunnel semble très probable.

Eaux. — Une question très importante est celle des eaux. Elle offre ici un intérêt spécial, attendu, d'une part, qu'on trouve sur le passage de la Gemmi un lac (le Daubensée) qui n'a pas d'issue apparente, mais qui s'écoule sans doute par des voies souterraines comme certains lacs du Jura. On a, d'autre part, à Louèche-les-Bains, des sources nombreuses et très abondantes dont il conviendra de rechercher attentivement l'origine.

nante ; nous admettons, en conséquence, un prix de 12 francs qui se rapprochera davantage de celui des tunnels à une voie percés dans les calcaires entre Brunnen et Flüelen.

Maçonnerie. — Le cube de maçonnerie exécuté au Hauenstein n'a été en moyenne que de 9 1/2 mètres cubes par mètre courant. Au Saint-Gothard, Louis Favre n'avait prévu que 4.66 mètres cubes par mètre courant, mais en réalité on en a exécuté 8 mètres. Nous prévoyons ici un cube de 10 mètres, chiffre modéré, si l'on tient compte de nos observations au sujet de la forme et des dimensions à donner aux maçonneries.

Les couches calcaires, que le tunnel traversera sans doute sur une grande longueur, se montrent à la surface du sol avec des escarpements de 1,000 mètres de hauteur qui prouvent leur grande résistance ; elles n'exigeront donc que peu ou point de revêtement dans le tunnel.

Quant au prix de la maçonnerie, nous dirons :

1° Que le tunnel de la Gemmi est situé à 300 mètres plus bas que celui de l'Arlberg, et par conséquent dans un climat beaucoup plus favorable ;

2° Que ses deux têtes étant peu éloignées des voies ferrées en exploitation seront facilement approvisionnées de matériaux de toute sorte, tels que chaux, ciment, etc. ;

3° Le pays est très peuplé et offre de grandes ressources qui permettront aux ouvriers d'y vivre à des prix modérés ;

4° La pierre est de nature calcaire et abonde partout ;

elle sera beaucoup plus facile à travailler que les gneiss de l'Arlberg et du Saint-Gothard.

5° Enfin, dans un terrain analogue, sur le lac des Quatre-Cantons, la maçonnerie des tunnels a coûté de 31 à 39 fr. et en moyenne 35 fr. le mètre cube.

Par ces motifs, nous pensons qu'un prix de 40 fr. sera très suffisant pour le premier kilomètre du tunnel.

D'après ces bases le premier kilomètre du tunnel coûtera :

56 m. cubes de déblais à 12 fr.....	672 fr.
10 m. cubes de maçonnerie à 40 fr.	400 »
Niches et aqueducs.....	48 »
TOTAL	1.120 fr.

Le prix de 1,120 fr. est notablement inférieur à celui de 1,278 fr. que donne le tableau de la page 225, il pourrait donc paraître trop faible, mais il convient de remarquer que ce dernier est calculé d'après la moyenne faite sur 69 tunnels dont quatre ont une grande longueur et ont coûté plus de 2,000 francs le mètre courant, tels que ceux de la Nerthe et de Blaizy. Si on les élimine, le prix moyen des 65 tunnels restants n'est plus que de 1,160 francs. Parmi les 69 tunnels considérés, il en existe d'ailleurs vingt qui ont coûté moins de 1,000 francs. Le prix de 1,120 francs que nous admettons est donc sensiblement égal au prix moyen des tunnels de dimension courante percés dans le terrain jurassique.

Coefficient de longueur et de vitesse.— Pour tenir compte des frais spéciaux résultant de la longueur

du tunnel et de la vitesse d'exécution, nous devons, d'après le tableau de la page 245, ajouter au chiffre précédent une somme d'environ 800 francs. Nous arrivons en fin de compte à un total de 1,900 francs ou, en chiffre rond, 2,000 francs.

Nous nous empressons de dire que ce chiffre ne comprend pas les dépenses qui pourront résulter d'événements imprévus, tels que la rencontre de terrains éboulеux, de sources abondantes, etc., et qui restent dans l'aléa des travaux de ce genre.

Le tunnel de la Gemmi présente, au reste, une circonstance favorable : c'est qu'on peut en exécuter près de la moitié au moyen de puits dont la profondeur ne dépassera pas 265 mètres dans la région Nord, et 370 mètres dans la région Sud. Ces puits faciliteront beaucoup l'exécution du souterrain, amélioreront l'aérage et permettront probablement de simplifier les installations mécaniques pour la perforation du massif central dont la longueur sera réduite à 12 kilomètres environ ; enfin, ils faciliteront l'aérage du tunnel quand la ligne sera mise en exploitation.

3° RACCORDEMENT AVEC LA GARE DE TURTMANN

La ligne qui reliera la tête sud du tunnel avec le chemin de fer du Valais à Turtmann aura 8 kilomètres de long et sera assez accidentée sur 4 à 5 kilomètres, mais le reste pourra être exécuté en remblais

provenant de l'excavation même du tunnel. Le tracé passerait à peu près au niveau du sol, au haut de la ville de Louèche qu'on pourrait ainsi facilement desservir par une gare spéciale.

Nous évaluons ce raccordement à 500,000 francs le kilomètre pour deux voies, soit en tout 4,000,000.

4° RÉSUMÉ

La ligne de Thoune à Turtmann coûterait en résumé :

Première section (Thoune, Mittholz), 28 kilomètres à 200,000 fr.....	5.600.000
Grand tunnel, 21 1/2 kilomètres à 2.000 francs.....	43.000.000
Raccordement à Turtmann, 8 kilomètres à 500.000 francs.....	4.000.000
ENSEMBLE.....	52.600.000

A ajouter :

1° Frais d'étude et d'administration, environ 3 %.....	1.400.000
2° Double voie à poser dans le tunnel.	2.000.000
TOTAL GÉNÉRAL....	56.000.000

Cette somme ne comprend ni les frais imprévus ni l'intérêt des capitaux pendant la construction, ni le matériel roulant.

XI

TUNNEL DU SIMPLON. — FRAIS DE CONSTRUCTION

1° HISTORIQUE DES COMPAGNIES DU SIMPLON

1853. — Le 22 janvier le canton du Valais a accordé à M. Adrien de la Valette, la concession de la ligne Bouveret-Sion (longueur 63,834 mètres). Le 2 février cette concession fut ratifiée par l'autorité fédérale.

1854. — *4 décembre.* Concession par le canton du Valais de la section Sion-Brigues-Simplon (longueur Sion-Brigues 52,720 mètres).

1859. — *14 juillet.* Ouverture à l'exploitation de la section Bouveret-Martigny (longueur 38,059 mètres).

1860. — *10 mai.* Ouverture de la section Martigny-Sion (longueur 25,775 mètres).

1865. — *6 juin.* Mise en faillite de la Compagnie. L'exploitation depuis son début a produit un déficit de 1,031,226 francs.

1867. — *15 juillet.* Une nouvelle Compagnie ayant encore à sa tête M. Adrien de la Valette, rachète la ligne pour 2,525,000 francs.

La première Compagnie avait dépensé 25,460,890 fr. au 31 juillet 1867 dont 109,064 francs pour étudier le Simplon.

1868. — *15 octobre.* Ouverture de la section Sion-Sierre (longueur 15,672 mètres).

Pendant cette année les recettes de l'exploitation se sont élevées à 451,070 francs et les dépenses à 292,627 francs ; le bénéfice net a donc été de 158,443 fr.

1870. — *21 juin.* (Veille de la guerre franco-allemande). Une proposition de loi est soumise en France au Corps législatif dans le but d'accorder au percement du Simplon une subvention de 48 millions.

1872. — *19 septembre.* Le Conseil fédéral prononce la déchéance de la Compagnie. Cette décision est confirmée par les Chambres fédérales le 3 décembre. La Compagnie a dépensé 10 millions de francs.

1873. — *5 avril.* 123 membres de l'Assemblée nationale reprennent la proposition de loi du 21 juin 1870.

1874. — *16 mars.* La ligne du Valais est vendue à un consortium formé de la Société financière vaudoise et de la Compagnie de la Suisse Occidentale pour le prix de 10,100 francs ; somme à laquelle il faut ajouter pour dettes hypothécaires 185,000 francs et pour frais des enchères 7,322 francs.

28 mai. Le projet de loi présenté à l'Assemblée nationale est repoussé, mais le rapport de la commission d'enquête sur les chemins de fer (rapporteur M. Cézanne) est renvoyé aux ministres des finances et des travaux publics.

1877. — *1er juin.* Ouverture de la section Sierre-Louèche (longueur 9,654 mètres).

On a dépensé pour l'étude du Simplon 180,750 francs.

Pendant cet exercice les recettes brutes de l'exploitation ont été de 689,760 francs et les dépenses de 521,407 francs; les recettes nettes ont donc été de 168,358 francs. Depuis 1868, soit pendant dix ans, la recette brute par kilomètre a varié de 6,000 à 8,300 fr. et la recette nette de 1,350 à 2,200 francs.

Le capital réalisé par la Compagnie à la fin de 1878 était de 6,200,000 francs, à savoir : 4 millions provenant des actions et 2,200,000 francs des obligations.

1880. — *25 novembre.* Cent neuf députés déposent une nouvelle proposition demandant que la France alloue pour la construction du Simplon une somme de 5 millions par an pendant dix ans.

1881. — *Juin.* La Compagnie du Simplon fusionne avec celle de la Suisse Occidentale.

12 juillet. La vingt-troisième commission d'initiative parlementaire fait à la Chambre des Députés un rapport sur la proposition du 25 novembre 1880 et conclut à ce que le Gouvernement fasse étudier à bref délai le projet d'une nouvelle ligne internationale à travers les Alpes et spécialement par le Mont-Blanc.

En France, le génie militaire paraît opposé à la percée du Simplon. Le corps des ponts et chaussées et même les grandes compagnies de chemins de fer, trouvent que ce percement est inutile et sans grand intérêt pour la France dans les conditions où il s'est présenté jusqu'ici.

La traversée de la Gemmi nous paraît seule pouvoir attirer au Simplon des sympathies par la satisfaction d'intérêts assez puissants pour en assurer l'exécution.

2° LES PROJETS DE TUNNEL

Nous avons déjà eu l'occasion de parler (page 9) des nombreux projets qui ont été présentés depuis trente ans pour la traversée du Simplon. On peut classer ces projets dans trois catégories correspondant aux diverses compagnies qui ont successivement dirigé cette entreprise.

Première période, 1853 à 1874 (*Compagnies françaises*). Dans toutes les études de cette longue période de vingt ans, la tête nord du tunnel a constamment été placée dans le voisinage du pont Napoléon construit sur la Saltine près de Brigues. Le tunnel passe sous le Monte Leone et aboutit au sud dans la vallée de la Diveria en divers points situés entre Gondo et Iselle.

Les seuls projets intéressants, au point de vue technique ou historique, qui ont paru dans cette période de temps, sont les deux suivants :

a) Le projet dressé en 1857 par M. Clo-Venetz et qui est le premier en date. La longueur du tunnel était de 12,200 mètres comme au Mont-Cenis. La tête nord était placée à Grund à la cote 1,068 mètres et celle du sud près de Gondo à la cote 1,011 mètres.

pendant trente ans. Plusieurs géologues et constructeurs avaient également donné leur avis et semblaient d'accord pour approuver complètement le tunnel de base proposé en 1882. On pensait ainsi en avoir fini et bien fini avec les plans et les nivellements si coûteux.

Projet de 1886. — Quelle n'a pas été la surprise générale lorsqu'en 1886 le tunnel de base tant prôné s'est vu abandonné : la Compagnie de la Suisse Occidentale rétrogradait de trente ans, en projetant un souterrain coudé de 16 kilomètres partant de nouveau du pont Napoléon, et dont la tête nord est à 140 mètres au-dessus du Rhône (soit à la cote 820 mètres.)

Ce changement de front frappait d'autant plus les esprits que, dans le Mémoire technique publié en décembre 1882, la Compagnie disait textuellement (page 13) :

« On voit, par cet exposé des différentes études faites au Simplon, que l'idée d'un tunnel *de base* a gagné sans cesse du terrain et qu'elle est aujourd'hui généralement admise. On n'en est plus aux craintes exprimées par M. Piarron de Mondésir. Le succès du Mont-Cenis, celui plus concluant encore du Saint-Gothard, et les résultats si remarquables et si rapides obtenus à l'Arlberg, *ont démontré que les longs souterrains sont entrés dans le domaine des travaux courants*, pourvu que les forces motrices nécessaires à la ventilation et aux perforatrices soient assurées. Aujourd'hui, toute proposition pour passer par-dessus le col avec un matériel spécial, *tout projet longeant les flancs de la montagne avec*

à Brigues elle a placé la gare de cette dernière localité au bord du Rhône ; mais, en réalité, elle n'avait, à ce qu'il paraît, aucune opinion arrêtée à cet égard, car elle ordonna sur le terrain des études hors de toute proportion avec le but à atteindre et qui n'eurent d'autre résultat que de reproduire, à la date du 1er janvier 1878, le projet présenté par M. Vauthier dix-huit ans auparavant. C'est ce projet qui figura à l'Exposition Universelle de 1878.

3e Période, 1881 à 1886. — En 1881, l'expérience du Saint-Gothard fit abandonner les projets présentés jusqu'alors, parce qu'ils passaient tous sous le Monte Leone à des profondeurs où la température devenait excessive.

Projet de 1882. — La Compagnie de la Suisse Occidentale ayant fusionné en 1881 avec celle du Simplon fit procéder, pendant les années 1881 et 1882, à de nouvelles études qui avaient pour base le tracé indiqué par Louis Favre en 1875.

Un examen approfondi des questions géologiques et thermiques eut pour effet de remplacer le tunnel en ligne droite par un tunnel coudé passant sous le col d'Avrona et qui suivait à peu près la direction du fond de la vallée de la Cherasca. Le tunnel ainsi modifié passait à 2 1/2 kilom. environ à l'est du Monte Leone et avait une longueur de 20,000 mètres (voir le plan annexé).

On croyait à cette époque avoir enfin trouvé la vraie solution du Simplon. Un grand nombre d'ingénieurs avaient successivement étudié cette affaire

Commission est unanime à déclarer que c'est seulement par un tunnel de base que cette traversée est possible, c'est-à-dire présente, au point de vue financier et au point de vue des relations de la Suisse avec l'Italie, un intérêt sérieux.

» La Commission a examiné avec le plus grand soin les divers projets de tunnel et les voies d'accès ; elle est d'avis que le projet à adopter dépend complètement du capital qui sera réalisable.

» *Pour elle, la meilleure solution serait incontestablement le tunnel de base de 20 kilomètres de longueur.* Si l'on peut réaliser le capital suffisant, c'est celui qu'elle conseillerait sans hésitation. Si ce capital ne peut être atteint, il faut se rejeter sur le tunnel de 16 kilomètres de longueur, qui donnerait encore toute satisfaction au point de vue de l'exploitation. »

Projet de 1888. — Si l'on veut faire réussir l'entreprise du Simplon et gagner la sympathie du public qui doit fournir les fonds pour son exécution, il est absolument nécessaire de revenir au projet de 1882, en dehors duquel tous les autres sont *surannés*, ainsi que l'a si bien dit et publié la Compagnie elle-même dès le 13 décembre 1882. Ce projet de 1882 présente cependant quelques défauts que je vais signaler et qu'il est facile de corriger :

1° Au lieu de placer l'entrée nord du tunnel au point indiqué par Louis Favre, c'est-à-dire à 1,000 mètres en amont de la gare actuelle, on l'a reportée à 2,448 mètres de cette gare. Cette modification paraît avoir été suggérée par des considérations purement géolo-

giques, mais elle présente deux graves inconvénients, qui sont :

Le premier, que la longueur de la ligne sera augmentée de 1,000 mètres, ce qui constituera une dépense supplémentaire pour la construction et une charge perpétuelle pour l'exploitation ;

Le second résulte de ce qu'en reportant le tunnel aussi loin vers l'est, on le fait passer sous le contrefort du Rosswald à 1,400 mètres au-dessous du sol naturel, de sorte que la température de la roche sera déjà de 30 degrés à 4 kilomètres de la tête (voir *les Grands Tunnels des Alpes*, par M. Stockalper, ingénieur, 1883) ;

2° Le tunnel se dirige en ligne droite sur Campo, au bord de la Cherasca, et fait ici un coude prononcé pour aller rejoindre le village d'Iselle, en passant sous le sommet du Dosso del Teggiolo, qui est à la cote 2,384 mètres; le souterrain traverse ainsi une région où la température sera très élevée et atteindra 31 degrés, d'après M. Stockalper.

En suivant ce tracé, on allongera de nouveau la ligne de 1,000 mètres; on commet donc ici les mêmes fautes qu'au Rosswald.

La tête sud étant à la cote 628 mètres, le raccordement avec Domo d'Ossola ne peut s'opérer (même avec une pente de 25 °/₀₀) qu'au moyen de travaux qui seront constamment à 25 mètres au moins au-dessus du fond de la rivière, c'est-à-dire dans des conditions d'exécution fort onéreuses.

Pour corriger les défauts que nous venons de signaler je propose (voir le plan annexé) :

1° De replacer la tête nord du tunnel au point fixé par Louis Favre, c'est-à-dire à 1,000 mètres de la gare actuelle, ce qui permettra d'établir à cette tête même la gare internationale sur une courbe de 1,000 mètres de rayon (1).

Le tracé rectifié se dirige comme dans le projet de 1882 sur le village de Campo en passant sous le Rosswald à une profondeur réduite à 1,100 mètres environ (soit 300 mètres de moins qu'au projet de 1882). La température dans le tunnel sera ainsi notablement abaissée sur 7 kilomètres environ.

2° Depuis Campo le tracé au lieu de passer sous le sommet du Teggiolo côtoie cette montagne et se dirige sur un point situé près du pont de la Cherasca. On passera ainsi sous le Teggiolo à une profondeur de 1,000 mètres seulement au lieu de 1,734 mètres, de sorte que la température dans le tunnel sera abaissée d'environ 10 degrés et ne dépassera pas 20 degrés au lieu des 31 degrés du projet de 1882.

3° Le tracé modifié passe comme en 1882 dans le voisinage de la pointe d'Avrona dont le sommet est à la cote 2,991 mètres. D'après M. Stockalper la température souterraine serait sur ce point de 36 degrés seulement au lieu des 40 degrés résultant du projet de 1886. M. le géologue Heim estime de son côté que la température serait de 34 à 35 degrés sur 3 kilomètres de long (voir le *Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles*, décembre 1883).

(1) Le plan annexé indique par erreur que la tête nord est placée à 1,500 mètres de la gare, tandis qu'elle doit être à 1,000 mètres seulement.

La pointe d'Avrona est très escarpée puisqu'à 600 mètres au nord comme au sud la cote du terrain n'est plus que de 2,400 mètres.

4° Un des grands avantages que présentera le tracé rectifié, c'est qu'à partir de la tête sud du tunnel, à la cote 545 mètres, on peut atteindre la gare de Domo d'Ossola avec une pente de 25 ‰ en suivant le fond de la vallée qui présente cette même inclinaison. Ce raccordement suivra constamment la rive droite de la Diveria et n'aura que 13 kilomètres. Il faudra perforer, il est vrai, quatre petits tunnels ayant ensemble 1,220 mètres, mais en dehors de ces ouvrages, le chemin de fer sera établi presque entièrement en remblais fournis par l'excavation du grand souterrain. Il ne nécessitera pas comme les tracés sur la rive gauche des expropriations coûteuses (1).

Dans ces conditions le raccordement ne coûtera pas plus de 400,000 francs le kilomètre, soit en tout 5,200,000 francs au lieu de 23 millions qu'exigerait le projet de 1886.

5° Les deux têtes du souterrain seront d'un accès très facile et présenteront à leurs abords des espaces convenables pour installer à peu de frais et commodément tous les ateliers, magasins et autres constructions, ce qui n'a pas lieu avec le projet de 1886.

6° Le tunnel aura, il est vrai, une longueur d'environ 21 1/2 kilomètres, mais sa construction sera plus facile que celle du souterrain de 16 kilomètres projeté par la Compagnie; car dans ce dernier la tempéra-

(1) Une des planches annexes donne un profil en long de ce tracé qui a été étudié sur les plans cotés au 1/5000 publiés en 1886 par la Compagnie du Simplon.

ture serait de 5° plus élévée et l'accès difficile de ses têtes augmenterait encore les dépenses de transports ainsi que celles des installations de toute nature.

7° Le relief du sol permettra d'ouvrir sur les deux premiers kilomètres de la région nord des puits qui faciliteront l'exécution de l'ouvrage. Un puits d'une profondeur de 680 mètres pourra également être creusé à Campo, c'est-à-dire à 7 kilomètres de la tête sud, et permettra d'activer le percement de la galerie et d'améliorer la ventilation des travaux.

8° Enfin tout compte fait, la distance entre Viege et Domo d'Ossola sera de 5 kilomètres plus courte avec le projet rectifié qu'avec le projet de 1886.

9° Au lieu de placer la tête sud sur la rive droite de la Cherasca, il conviendra peut-être de la reporter sur la rive gauche, en dessous du village de Bertonio. Le tunnel serait ainsi allongé de 250 mètres, mais le raccordement sur Domo d'Ossola serait, en échange, réduit de 500 mètres. Le tracé s'éloignerait encore du Teggiolo d'une centaine de mètres. La longueur à percer dans le gneiss dur d'Antigorio serait diminuée. Enfin, on aurait sous Bertonio, à la tête même du souterrain, un emplacement commode pour y établir la gare de Varzo.

3° TERRAINS ET EAUX

Historique. 1859. — M. Vauthier, ingénieur en chef de la ligne d'Italie, a fait étudier la constitution géologique du Simplon en vue du projet qu'il a présenté en 1860 et dont nous avons déjà parlé. Il a

rendu compte de ces études dans l'ouvrage qu'il a publié en 1874. Ces études ont été faites par M. Gerlach, ingénieur allemand.

1877. — En 1877 la Société du Simplon a fait faire de nouvelles études par MM. les géologues Rénevier, Heim et Lory. M. Rénevier a publié à ce sujet une notice avec coupes géologiques dans le *Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles*, d'avril 1878.

1882. — Enfin en 1882 de nouvelles explorations ont encore été faites par les mêmes géologues en vue du tracé coudé (ancien tracé Louis Favre modifié) étudié à cette époque par la Compagnie de la Suisse Occidentale. Ces explorations font l'objet d'un Mémoire étendu accompagné de profils en long et en travers et publiés également dans le *Bulletin de la Société vaudoise*, du mois de décembre 1883.

On trouvera sur l'une des planches annexées une réduction sommaire de la coupe géologique qui accompagne ce Mémoire.

Voici les conclusions les plus importantes qui résultent de ces études relativement au tracé coudé projeté en 1882.

Le tunnel du Simplon se divise au point de vue géologique en trois sections de longueurs inégales que nous allons considérer successivement en partant du nord.

Première section. — La première section ayant environ 4 kilomètres est formée essentiellement de *schistes gris* ou *schistes lustrés* tendres, plus ou

moins calcaires, souvent micacés et passant parfois aux calchistes micacés. Ils sont parsemés de veines de calcites et de quartz ayant quelquefois un mètre d'épaisseur.

Ces schistes sont analogues à ceux qu'on a rencontrés au Saint-Gothard sous la vallée d'Andermatt et plus semblables encore à ceux de Bardonnèche dans lesquels le Mont-Cenis a été percé sur les trois quarts de sa longueur et qui présentent les meilleures conditions de solidité et d'avancement rapide pour les travaux.

« Au Simplon comme à Bardonnèche les schistes » lustrés sont généralement secs, et l'on peut s'at- » tendre à ce qu'ils se comportent mieux que leurs » similaires du Saint-Gothard qui reçoivent d'abon- » dantes infiltrations des alluvions de la plaine » d'Andermatt, fonctionnant comme une vaste éponge. » Au Simplon, au contraire, la configuration du sol » au dessus du tracé coudé exclut toute crainte d'in- » filtrations. On n'aura donc pas à prévoir pour cette » section des revêtements de dimensions exception- » nelles, sauf peut-être sur de très faibles lon- » gueurs. » (*Bulletin de la Société vaudoise*, décembre 1883, page 9.)

A gauche et à droite du tracé coudé de 1882, les géologues indiquent près de la tête nord des masses de gypses distinctes les unes des autres et qui ne paraissent pas s'étendre jusqu'au tunnel projeté, ce qui fait que, déjà en 1877, les géologues recommandaient particulièrement ce tracé.

Les couches de *schistes lustrés* étant sensiblement verticales, présenteront une grande résistance à l'écra-

sement et permettront d'adopter des revêtements d'une moindre épaisseur que si ces couches étaient horizontales.

Quant à la date géologique de ces terrains on la considère généralement comme appartenant à l'époque du trias, surtout à cause de la présence des gypses et des dolomies; mais il est possible que la partie supérieure de ce massif soit liasique et que la base en soit anthracifère.

Seconde section. — La seconde section de 10 kilomètres environ est formée de schistes cristallins feuilletés, très variés et irrégulièrement entremêlés qui ne présentent pas de différences importantes au point de vue technique. Ils renferment au moins 7 bancs calcaires, interstratifiés d'une épaisseur de 20 à 50 mètres chacun, et dont la puissance totale doit être de 300 mètres au moins. Plusieurs sont des dolomies assez tendres, équivalant par la dureté aux dolomies d'Airolo. D'autres sont des marbres saccharoïdes passant au *cipolin* comme au pont de la Saltine sous Bérisal, et à Casparione au-dessus de Campo. Ces roches calcaires correspondent tout à fait au point de vue technique au marbre cristallin trouvé dans le tunnel du Gothard sous Andermatt, et dans lequel le percement a eu son maximum d'avancement.

Parmi les schistes cristallins qui constituent le sol de cette section, on peut distinguer, suivant leur ordre de fréquence, les trois variétés suivantes :

a) Le *micaschiste* qui recouvre immédiatement le gneiss d'Antigorio, et qui est assez tendre; il est plus

ou moins calcarifère ou grenatifère, et comprend aussi d'autres schistes feuilletés *sériciteux* ou *chloriteux* qui ont leurs analogues dans le tunnel du Saint-Gothard.

b) Le *gneiss schisteux* qui est presque aussi abondant que le micaschiste, et alterne souvent avec lui sans grande régularité.

c) Enfin les *schistes amphiboliques* qui jouent un rôle peu important, et sont intercalés en paquets plus ou moins épais dans les micachistes et les gneiss dont ils constituent les parties les plus dures.

Ces trois groupes de schistes, très variables d'aspect et de distribution, se répètent si souvent sans régularité apparente qu'il est impossible d'estimer l'espace que chacun d'eux pourra occuper dans le tunnel. Au point de vue technique cela n'a du reste pas d'importance, car à part quelques bancs exceptionnels plus durs, ce grand ensemble présente toujours à quelque chose près la même consistance. Parmi les roches siliceuses cristallines, ils représentent les types les plus favorables ni trop durs ni trop tendres, intermédiaires sous ce rapport entre les roches des sections nord et sud.

Quant aux infiltrations permanentes, elles sont peu à craindre dans cette section centrale, en raison, soit de la nature des roches, soit de la grande profondeur du tunnel, soit enfin de l'écoulement facile des eaux superficielles.

Les géologues pensent que ces divers schistes sont d'origine sédimentaire, et Gerlach les désignait sous le nom de *schistes métamorphiques anciens*.

Troisième section. — La troisième section a 6 à 7 kilomètres de long. Elle commence un peu en amont du coude du tunnel, près Campo. Elle est formée par une grande voûte de gneiss granitoïde dit d'Antigorio, avec une calotte inférieure de schistes feuilletés.

Ce gneiss peut pour sa résistance à la perforation, être comparé au gneiss granitoïde du Saint-Gothard, mais cependant un peu moins dur que celui-ci. Il est de couleur claire, riche en feldspath blanc (*Orthose*) et en quartz finement grenu; il contient habituellement deux espèces de mica, blanc et noir, et accessoirement du sphène (*Titanit*). Quoique très compacte et résistante, cette roche est passablement fissurée, on l'exploite aux environs de Gondo et d'Iselle pour boute-roues, poteaux, parapets, etc.

Ce massif paraît avoir une épaisseur d'au moins 1,000 mètres.

On trouve au-dessous de la voûte formée par le gneiss d'Antigorio, un nouveau schiste micacé et feuilleté plus ou moins calcarifère, de grain très uniforme et très facile à perforer. Il serait sous ce dernier rapport intermédiaire entre les roches des deux premières sections; et assez compacte et solide pour ne pas nécessiter de forts revêtements.

En ce qui concerne les eaux, les géologues font observer que la montagne du Teggiolo est très sèche et que les infiltrations sont peu à craindre dans cette troisième section.

4° TEMPERATURE & VENTILATION

1° Période de la construction. — Voici comment s'expriment les géologues dans leur rapport au sujet des températures qu'on trouvera en suivant le tracé du mois d'août 1882:

« De tous les tracés proposés jusqu'ici pour le tunnel du Simplon, le plus favorable, au point de vue thermique, est incontestablement celui d'août 1882, c'est-à-dire le tracé coudé de 20 kilomètres. Avec ce tracé, le maximum de température ne paraît pas devoir dépasser 35° centigrades. Ce maximum aurait été de 4° plus élevé, avec le tunnel droit (projet de 1881), et bien plus considérable encore avec les autres projets antérieurs, qui passaient plus directement sous le grand massif du Monte-Leone. L'avantage du tracé coudé d'août 1882, vient de ce que ce dernier bénéficie, d'un côté, du thalweg de la Ganther ou Saltine supérieure, de l'autre côté, de la grande vallée de la Cherasca, avec son magnifique cirque de l'Alpe Diveglia.

» Ce tracé permettrait, en outre, de forer deux puits de ventilation. Par ce moyen et d'autres procédés artificiels, il nous paraît hors de doute qu'on pourrait abaisser encore sensiblement la température maximum à l'intérieur du tunnel. Si, de plus, on introduisait fréquemment des wagons de glace, on parviendrait non seulement à rafraîchir l'air intérieur de la galerie, mais surtout à le dessécher, grâce à la propriété que possède la glace de condenser les vapeurs à sa surface.

» Dans ces conditions, et avec les précautions dictées par l'expérience, il est à peu près certain que, malgré les quatre à cinq degrés d'excès de température naturelle, le travail pourrait devenir plus facile, dans le tunnel du Simplon, qu'il ne l'a été dans celui du Gothard. » (*Bulletin de la Société vaudoise*, décembre 1883, page 24.)

Quant au tunnel de 16 kilomètres projeté en 1886, voici ce qu'en disent les experts (Rapport du 17 novembre 1886, pages 28 et 32) :

« La Commission est d'avis qu'au *Saint-Gothard* des travaux bien conduits auraient diminué dans une proportion considérable toutes les difficultés rencontrées, et la preuve de ce qu'elle avance est que, parmi les ouvriers qui étaient au front d'attaque, exposés à la plus haute *température de la roche, la mortalité a été cependant normale et qu'aucune maladie ne s'est produite* du fait de la température. La Commission croit donc que, si les travaux du *Simplon* sont dirigés avec soin, si on adopte les dispositions prises à l'Arlberg pour les logements d'ouvriers, l'installation d'hôpitaux, d'écoles, etc..., si l'on est sévère pour l'admission du personnel travaillant dans le tunnel, si l'on surveille les divers établissements afin d'éviter les causes d'ivresse et de débauche, si l'on fait activement les travaux de revêtement intérieur de manière que les galeries d'attaque n'aient qu'une faible avance sur la partie du tunnel achevée, si une ventilation énergique est installée, si l'on dispose sur les chantiers des water-closets et un service de boisson, — on arrivera sans peine aux 4 kilomètres

où la température dépassera celle trouvée au Saint-Gothard.

» On peut admettre qu'une ventilation énergique pourra rafraîchir notablement la roche. La Commission a, à l'appui de cette opinion, un fait incontestable : c'est qu'après deux ans au Saint-Gothard, la *température de l'intérieur du tunnel s'est abaissée de* 7°. Il est donc évident que, si, dès le commencement des travaux, on ventile énergiquement, on diminuera d'une manière notable la température dans le tunnel et sans grande dépense, attendu qu'il suffira *d'une force de 120 chevaux pour avoir une vitesse de 4 m. par seconde*, vitesse qu'il ne faut pas dépasser ; si en outre, une fois par semaine, on arrête les travaux et qu'on ventile à *double vitesse*, on pourra abaisser dans une certaine mesure la température de la roche.

» La Commission ne saurait trop insister sur la nécessité qu'il y aura à procéder rapidement au revêtement intérieur du tunnel, car c'est là une cause de *refroidissement constatée au Gothard.*

» Par les diverses dispositions indiquées, la Commission pense qu'on travaillera dans le tunnel sur presque tout le parcours, sans grandes difficultés ; cependant, voulant parer à toutes les éventualités, elle a admis que sur 1 ou 2 kilomètres, c'est-à-dire sur 1 kilomètre de chaque front d'attaque, on rencontrerait des températures telles que ces moyens pourraient être insuffisants.

» Elle croit que, dans ce cas, on devrait prendre les dispositions suivantes :

» *1° Rafraîchissement par la ventilation.*

» 2° *Rafraîchissement par aspersion d'eau froide pulvérisée.*

» 3° *Rafraîchissement par la fusion de la glace.*

» 4° *Rafraîchissement au moyen de l'expansion de l'air comprimé.*

» *En résumé*, sur cette question des difficultés que l'on pourra rencontrer au milieu du tunnel par suite de la haute température, votre Commission pense avoir établi qu'il est possible de les vaincre par l'un des divers procédés indiqués et même, s'il est nécessaire, par l'emploi simultané de deux de ces procédés.

» Elle est convaincue que presque toutes les difficultés qui se sont produites au Saint-Gothard disparaîtraient au Simplon par une bonne organisation des chantiers, par des installations rationnelles aux deux têtes du tunnel et par une surveillance rigoureuse du personnel admis et de sa moralité ; — qu'enfin dans les parties à hautes températures, on arrivera à en supprimer les inconvénients en ne travaillant que toutes les 12 heures, et que cette perte de temps sera compensée par la marche normale des travaux.

» La Commmission estime que les hautes températures occasionneront seulement une augmentation de *dépense de deux millions et un retard dans l'achèvement du percement* de 15 à 18 mois. »

2° Période de l'exploitation. — Nous avons déjà fait connaître, page 86, comment se faisait la ventilation dans le tunnel du Saint-Gothard depuis qu'il est ouvert à l'exploitation. Nous compléterons ces renseignements en relatant les observations que con-

[illegible] pages 24 et 27, le Rapport fait par les experts [illegible] déjà cité :

« La question de l'*aération d'un tunnel* a été [illegible] d'une étude spéciale de la Commission, au point [illegible] de la longueur exceptionnelle et dans le cas [illegible] tunnel à simple voie ou d'un tunnel à double voie.

« Le tunnel du Saint-Gothard s'aère *tout naturellement, sans aucune difficulté, malgré un trafic [illegible] et des rampes de 5,8;* la différence de [illegible] est de 36 mètres.

« Au Mont-Cenis, la ventilation se fait par des moyens [illegible] le dénivellement de 132m50 entre les deux [illegible] du tunnel et la *différence notable de température entre l'intérieur et l'extérieur assurent une [illegible] suffisante.*

« Les *conditions de ventilation se sont améliorées [illegible] de l'ouverture du raccordement de Modane,* [illegible] *en soit résulté un certain allongement du [illegible]*

« Dans *quatre jours par an, au plus,* il arrive [illegible] des circonstances atmosphériques exceptionnelles [illegible] naturel ne s'exerce pas avec une suffisante [illegible] et parfois le courant se renverse dans le sens de [illegible]che vers Modane ; on remédie alors au [illegible] d'aération en diminuant la charge des trains, afin [illegible] puissent parcourir le tunnel ayant le feu [illegible] avec une vitesse très grande.

« Il [illegible] aucun nécessaire de recourir à des mesures [illegible] en ce qui concerne les trains de voyageurs, [illegible] de la grande vitesse de ces trains.

« [illegible] établi d'une manière certaine pour votre

Commission que, d'une façon ou d'une autrre, l'exploitation d'un tunnel de 20 kilomètres de longueur à simple ou double voie ne présente aucune difficulté pour la ventilation et que, s'il en survenait d'imprévues, il serait facile de les surmonter avec une légère augmentation de dépenses qui ne serait nullement de nature à faire abandonner l'exploitation.

» Votre Commission est d'avis que les dispositions spéciales de ventilation ne seraient utiles à prendre qu'afin d'être dans des conditions meilleures qu'au Saint-Gothard, au Mont-Cenis et à l'Arlberg et pour que, *dès les premiers jours de l'exploitation, l'impression du public soit favorable à la traversée des Alpes par le Simplon.* »

5° FRAIS DE CONSTRUCTION

Excavation. — Nous avons déjà établi (page 226), que pour les tunnels percés dans les terrains cristallins, un prix de 25 francs par mètre cube était suffisant pour l'excavation totale. On vient de voir que, suivant l'opinion des géologues, le tunnel du Simplon présente des roches d'une exploitation plus facile que celles du Saint-Gothard et que le gneiss d'Antigorio lui-même, quoiqu'ayant une assez grande dureté, sera moins résistant que le granit de Gœschenen.

Malgré ces prévisions avantageuses, le comité du

Simplon a cependant appliqué au projet du mois d'août 1882 un prix de 32 francs par mètre cube d'excavation, ce qui fait une augmentation de 28 °/. sur le prix de 25 francs indiqué ci-dessus. Ce comité ayant pris pour base de ses évaluations la méthode suivie à l'Arlberg, nous donnons dans le tableau suivant les prix des deux entreprises pour en faciliter la comparaison.

DÉSIGNATION DES TRAVAUX	PRIX DU MÈTRE CUBE		AUGMENTATION	
	ARLBERG	SIMPLON	Effective	P. 0/0
	fr.	fr.	fr.	fr.
Galerie de base, 7 mètres cubes....	45 »	64 30	19 3	43
Galerie supérieure, 4 m. c. 60.....	45 »	54 30	9 3	19
Abattage, 45 mètres cubes environ..	18 50	25 »	6 5	34
MOYENNES.....	24 10	32 »	7 90	33

Les prix pour les *deux petites galeries* du Simplon sont certainement excessifs, car nous avons signalé page 230, qu'au Saint-Gothard la galerie d'avancement n'avait coûté que 38 fr. 30 suivant M. l'ingénieur Kauffmann et 42 fr. 20 d'après M. A. Pernolet.

Loin d'augmenter les prix de l'Arlberg on aurait dû les réduire. On aurait agi ainsi comme l'ont fait les ingénieurs autrichiens, qui ont profité des expériences du Saint-Gothard pour fixer à 45 francs le prix par mètre cube des petites galeries du tunnel de l'Arlberg. L'augmentation admise au Simplon est d'autant plus anormale que, dans son Mémoire technique en date du 13 décembre 1882, le comité du Simplon admet un avancement moyen de 1m50 par jour à chaque tête (page 55, c'est-à-dire supérieur à celui de l'Arlberg.

A la page 56 du même Mémoire, on lit d'ailleurs ce qui suit :

« Nous avons en première ligne tenu compte des expériences réalisées à l'Arlberg où, en raison des progrès obtenus dans les travaux, on applique des prix plus bas qu'au Gothard, *prix qui sont cependant très rémunérateurs pour les entrepreneurs chargés de ces travaux.* »

Si les prix de l'Arlberg étaient *très rémunérateurs*, pourquoi les augmenter de 33 0/0 au tunnel du Simplon? Il est vrai qu'à l'Arlberg on a rencontré quelques terrains assez tendres, mais cet avantage a été plus que compensé par l'abondance des eaux et les dépenses en boisage, toutes choses qu'on n'a pas à redouter au Simplon.

Le prix de l'*abattage* à exécuter en dehors des deux petites galeries, a été fixé en 1882 à 25 francs par mètre cube *pour le premier kilomètre* du grand tunnel, tandis que le même travail n'a été estimé qu'à 12 et 14 francs pour les tunnels de faible longueur ou ayant moins de 1,000 mètres. Ces chiffres sont donc contradictoires.

Maçonnerie. — Le prix de la maçonnerie a été fixé en 1882 à 30 fr. le mètre cube, prix moyen s'appliquant aux travaux du premier kilom. de tunnel. La maçonnerie en moellons bruts pour pieds-droits était fixée à 22 fr. et celle en moellons lités pour voûte à 33 fr. Ces prix sont eux-mêmes supérieurs de 40 °/₀ à ceux de la maçonnerie à ciel ouvert. Le comité du Simplon explique comme suit ces chiffres si avantageux :

1° A la tête sud on aura sur place une excellente

pierre dans le gneiss d'Antigorio, et à la tête nord on trouvera à Naters, en face du tunnel, une carrière de gneiss excellent.

Au Gothard, il fallait du côté d'Airolo aller chercher et fabriquer les moellons jusque près du sommet de la montagne, à une altitude de près de 2,000 mètres, où l'on ne pouvait travailler et transporter que pendant quelques mois de l'année et où le transport seul coûtait près de 15 francs le mètre cube.

A l'Arlberg, de même il fallait aller chercher très loin les matériaux pour maçonneries, surtout du côté ouest.

2° La chaux hydraulique de Noiraigues, qui revenait à 65 francs la tonne à la tête nord du Saint-Gothard, ne coûtera que 36 francs à Brigues.

Le mémoire technique assure qu'au Simplon on sera dans une situation exceptionnellement avantageuse au point de vue de l'approvisionnement des matériaux et que la facilité des transports aura en outre une influence favorable sur le prix des installations et sur celui des produits alimentaires consommés par les ouvriers. Ces observations confirment celles que nous avons déjà faites au sujet de la Gemmi en discutant le prix de la maçonnerie que nous avons fixé, pour ce tunnel, à 40 francs le mètre cube.

Coefficient relatif à la longueur du tunnel. — Après avoir établi les prix pour le premier kilomètre de tunnel, le comité du Simplon a fixé les prix des kilomètres suivants en appliquant la formule que nous avons déjà signalée au sujet de l'Arlberg et qui a pour effet d'augmenter le prix du premier kilomètre

de 5 °/₀ (soit de 110 francs par mètre courant de tunnel) à chaque kilomètre suivant. Nous n'avons donc aucune observation à faire sur cette question.

Installations mécaniques. — Nous avons vu que, d'après l'expérience acquise, les installations mécaniques nécessaires pour un tunnel de 20 kilomètres ne devaient coûter que 4,500,000 francs (page 244). Le comité du Simplon a élevé cette dépense à 7 1/2 millions, comprenant 5,771.045 francs pour les installations mécaniques proprement dites; 1,170,000 francs pour bâtiments et 558,955 francs pour chemins et somme à valoir. Ces évaluations sont certainement fort exagérées eu égard à la proximité de la force motrice et aux dispositions favorables que présente le terrain près des têtes du tunnel. Le comité estime d'ailleurs lui-même que son évaluation est très élevée et déclare en outre que les grandes facilités de transports *permettraient d'économiser au Simplon 1 1/2 million* sur le prix des installations du Saint-Gothard.

Devis du mètre courant de tunnel. — Nous admettons pour le Simplon les mêmes cubes de déblais et de maçonneries que pour la Gemmi et nous en établissons comme suit le prix du mètre courant :

Excavation de 56 mètres à 25 francs....	1,400 fr.
Maçonneries 10 mètres cubes à 30 fr....	300
Niches et aqueducs.....	50
TOTAL A REPORTER...	1,750 fr.

Report.....	1.750 fr.
A ajouter pour coefficient de longueur et de vitesse d'exécution suivant le tableau de la page 245.....	800 fr.
TOTAL GÉNÉRAL....	2.550 fr.

Nous ferons observer que le prix de 1,750 francs est de 100 francs supérieur à celui que nous avons indiqué page 225 comme prix moyen de revient de 56 tunnels exécutés dans les terrains cristallins.

Le comité du Simplon a de son côté établi en 1882 un prix de 3,273 francs, dont voici le détail :

1° *Prix du premier kilomètre* :	
Petite galerie à la base	450 fr.
Petite galerie au faîte	250
Abattage 51 mètres cubes à 25 fr.....	1.275
Remplissage derrière les maçonneries.	5
Maçonneries 11 mètres 45 à 30 fr.....	343
Niches et aqueducs.....	35
TOTAL.....	2.358 fr.
2° *Prime* relative à la longueur du tunnel	450 fr.
3° *Installations* mécaniques.....	375
4° *Puits* et sondages	90
TOTAL GÉNÉRAL....	3.273 fr.

Ce prix correspond à un muraillement complet ayant 0m50 d'épaisseur à la voûte et 0m75 aux pieds-droits.

La différence de 723 fr. entre notre prix et celui du comité du Simplon, s'explique par les faits suivants :

1° Augmentation d'environ 7 fr. par mètre cube d'excavation;

2° Dépense de 90 francs pour puits et sondages. Cette dépense est incertaine et aléatoire et doit contribuer à diminuer les frais d'installations mécaniques ;

3° Augmentation de 1 1/2 mètre cube pour les maçonneries par suite de l'épaisseur exagérée donnée aux pieds-droits ;

4° Le cube d'excavation par mètre courant est de $62^{m}60$ au projet de 1882 au lieu de 56 mètres cubes que nous considérons comme suffisant. La différence de $6^{m}6$ s'explique approximativement comme suit :

a) Le projet de 1882 prévoit un rayon de $4^{m}10$ pour l'intérieur de la voûte au lieu de 4 mètres, chiffre suffisant pour un tunnel en ligne droite et en terrain solide. Il résulte de là une augmentation de 2 mètres cubes.

b) Un aqueduc de $0^{m}60$ de largeur au minimum et de $0^{m}80$ de profondeur exige une fouille de $1^{m}40$ qu'on peut éviter.

c) On prévoit partout derrière les voûtes un remplissage en pierres cassées de $0^{m}10$ à $0^{m}15$ d'épaisseur, d'où il résulte une augmentation de 2 mètres cubes. Il nous paraît inutile de faire dans des terrains solides des excavations coûteuses pour les remplir de pierrailles, à moins qu'il n'y ait de forts suintements d'eau qui pourraient exiger la construction de ces filtres, mais cela ne peut avoir lieu que sur quelques points exceptionnels.

4° La dépense relative au coefficient de longueur et de vitesse est sensiblement la même dans les deux devis, ce qui tient à ce que dans nos évaluations, les

dépenses pour installations mécaniques sont augmentées des intérêts pendant la construction, ce qui en rapproche le montant total de celui admis par la Société du Simplon.

RESUME

D'après ce qui précède la traversée du Simplon coûterait, savoir :

Grand tunnel 21 1/2 kilomètres à 2,550 fr.....	54.825.000 fr.
Lignes d'accès à deux voies, 14 kilomètres (dont un en Suisse), à 400,000 fr.....	5.600.000 »
TOTAL.....	60.425.000 fr.
A ajouter :	
1° Frais d'études et d'administration environ 3 0/0.....	2.025.000 fr.
2° Double voie dans le tunnel.....	2.150.000 »
TOTAL GÉNÉRAL....	64.600.000 fr.

Cette somme ne comprend ni les dépenses imprévues, ni le matériel roulant, ni l'intérêt des capitaux pendant la construction.

CONCLUSION

Si nous considérons maintenant l'ensemble des travaux à exécuter entre Thoune et Domo d'Ossola pour réaliser la ligne directe que nous proposons entre Calais et Milan, on peut les évaluer de la manière suivante :

1° Traversée de la Gemmi, 57 1/2 kilomètres (voir page 255)...	56.000.000 fr
2° Traversée du Simplon, 35 1/2 kilomètres comme ci-dessus.	64.600.000 »
TOTAL.....	120.600.000 fr.

A cette somme il faut ajouter :

3° L'intérêt des capitaux pendant la période de construction ; or, il convient de remarquer que la somme précédente comprend déjà 3 1/2 millions représentant l'intérêt des 9 millions consacrés aux installations mécaniques.

Nous admettons en outre que le Simplon recevra une subvention sans intérêts de 30 millions, et la Gemmi une somme analogue de 20 millions, soit en tout 50 millions. Il ne restera ainsi à compter les intérêts que pour un capital d'environ 67 millions.

En admettant que les travaux durent 10 ans et que l'intérêt soit de 4 0/0 l'an, le chiffre des intérêts s'élèvera à..... 12.000.000 fr.

4° Le matériel roulant. — Une somme de 20,000 fr. par kilom. nous paraît suffisante pour les

premières années de l'exploitation, soit pour 93 kilomètres.....	1.860.000 fr.
5° Imprévu des travaux et pour arrondir (13 0/0).....	15.540.000 »
TOTAL GÉNÉRAL...	150.000.000 fr.

Le chiffre de **150 millions** que nous avons annoncé dès le début de cet ouvrage (page 8), comme suffisante pour relier Thoune à Domo d'Ossola, se trouve ainsi justifié.

TABLE DES MATIÈRES

Pages

I. Traversée des Alpes Bernoises. — Origine du projet. 5
Description du tracé entre Thoune et Louèche..... 11
Tunnel de la Gemmi..... 13
Abréviation des distances..... 18

II. Description des grands tunnels du Jura. — Le Crédo. — Les Loges..... 25
Tunnel du Hauenstein..... 33

III. Description des grands tunnels des Alpes..... 39
1° Tunnel du Mont-Cenis..... 40
Terrains, 40. — Eaux, 41. — Chaleur, Maçonnerie, 42. Aqueduc, 42. — Eclairage, avancements, 43. — Durée des travaux, 47. — Frais de construction, 47. — Commencement des travaux, 51. — Convention avec la France, 54. — Rapport Conte, 56. — Chambre italienne, 57. — Rapport Sommeiller, 58. — Commission d'études, 62. — Marché avec Sommeiller, 64. — Nouvelle convention avec la France, 66. — Résumé des évaluations, 67. — Coût définitif, 68. — Installations, 70. — Prolongement du tunnel, 73.

2° Tunnel du Saint-Gothard..... 75
Terrains, 75. — Eaux, 80. — Chaleur, 82. — Terrains éboulеux, 86. — Procès du Saint-Gothard contre L. Favre, 95. — Organisation vicieuse des chantiers, 97. — Maçonnerie, 104. — Radier, aqueduc, avancements, 106. — Frais de construction, 108. — Prix des maçonneries et de l'excavation, 110. — Prix d'exécution, 111. — Journées employées, 114. — Dynamite consommée, Frais généraux, 115. — Intérêts des capitaux, 116. — Matériel, 117.

3° Tunnel de l'Arlberg..... .. 119
Terrains, 122. — Avancements, 124. — Maçonnne-

Pages

— C . . . 127. — E . . . 128. — Traité à . . . 128. — . . . 129. — . . . 130. — Devis estimat. 134. — Dyna- . . . 136. — Installations. 137. — . . . 138.

. . . des tunnels des Alpes et du Jura. 142

. . . TUNNELS DE LA FRANCE . . . 144

. . . Estiaux, 141. — Tunnels du centre de . . . — La Nerthe. 150. — B . . . 152. — . . . 154.

. . . ESPAGNE. . . . 161

. . . 161. — Pyrénées. 162. — . . . 165.

. . . 166

. . . EXISTANT EN FRANCE EN 1862 et . . . 190

. . . — TUNNELS DE SECOND . . . 192

. . . 198

. . . 199

. . . — . . . s verticales. 206. . . . 227. — Tunnel . . . 228. — Pieds- . . . s Alpes, 211. . . . — Aqueducs, . . .

225

. . . — . . . 227. . . .

234

. . . 237

. . . 238. — Tableau . . . 243.

247

. . . — Fi . . . 251. — Ma- . . . et vitesse

Pages

d'exécution, 253. — Raccordement avec la gare de Turtmann, 254. — Résumé, 255.

XI. Traversée du Simplon. — Frais de Construction 256

Historique des Compagnies du Simplon 256

Les Projets de tunnels, 259. — Terrains et eaux, 268. Température et ventilation, 274. — Frais de construction, 279. — Résumé, 286. — Conclusion, 287.

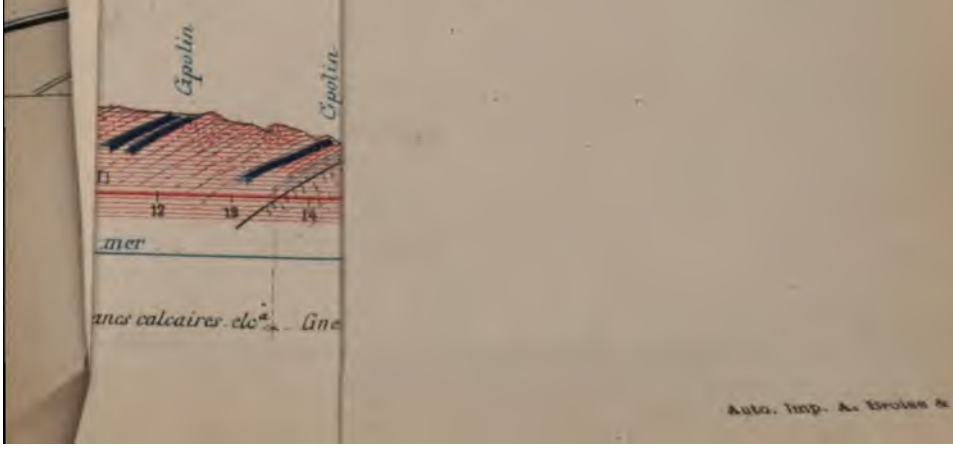
ERRATA

Page 5, ligne 13, au lieu de *ains*, lire ***ainsi***.
— 10, — 31, — *Schwitz*, lire *Schwyz*.
— 11, lignes 20 et 23, au lieu de ***Mitthoz***, lire ***Mittholz***.
— 12, ligne 1, au lieu de ***Mitthoz***, lire ***Mittholz***.
— 13, — 15, — *aux tunnels*, lire *au tunnel*.
— 14, — 14, — ***Mitthoz***, lire ***Mittholz***.
— 15, — 15, — ***Mitthoz***, lire ***Mittholz***.
— 16, — 5, — *pontes*, lire *pentes*.
— 16, — 21, — *12 °/..*, lire *12 °/.*.
— 19, — 18, — *Undervilier*, lire *Undervelier*.
— 22, — 11, — *Undervilier*, lire *Undervelier*.
— 32, — 4, — *8 francs*, lire *9 fr. 60*.
— 52, — 8, — *2m08* et *2m77*, lire *2m047* et *2m44*.
— 62, — 30, — *815 mètres*, lire *765 mètres*.
— 63, — 23, — *6,840*, lire *6,924*.
— 64, — 18. — *815 mètres*, lire *765 mètres*.
— 65, — 1, — *4,373 mètres*, lire *4,387 mètres*.
— 65, — 28, — *2m175*, lire *1m88*.
— 66, — 8, — *4,373 mètres*, lire *4,387 mètres*.
— 68, — 14, — *4,373 mètres*, lire *4,387 mètres*.
— 74, — 22, — *stross*, lire *strosse*.
— 80, — 23, — *N*, lire *M*.
— 91, — 32, — *sont*, lire *ont*.
— 100, — 30, — *est voûté*, lire *Il est voûté*.
— 107, — 19, — *7,378m70*, lire *7,744m7*.
— 107, — 19, — *7,134m7*, lire *7,167m70*.
— 107, — 11, — *1,319 mètres*, lire *1,593 mètres*.
— 107, — 11, — *491m30*, lire *494m30*.
— 125, — 12, — *6m90*, lire *7m30*.
— 125, — 13, — *2m90*, lire *3 mètres*.
— 135, — 12, — *234 francs*, lire *334 francs*.
— 136, — 6, — *90 francs*, lire *70 francs*.
— 144, — 3, — *tunnels*, lire *tunnel*.
— 144, — 13, — *gord*, lire *gore*.

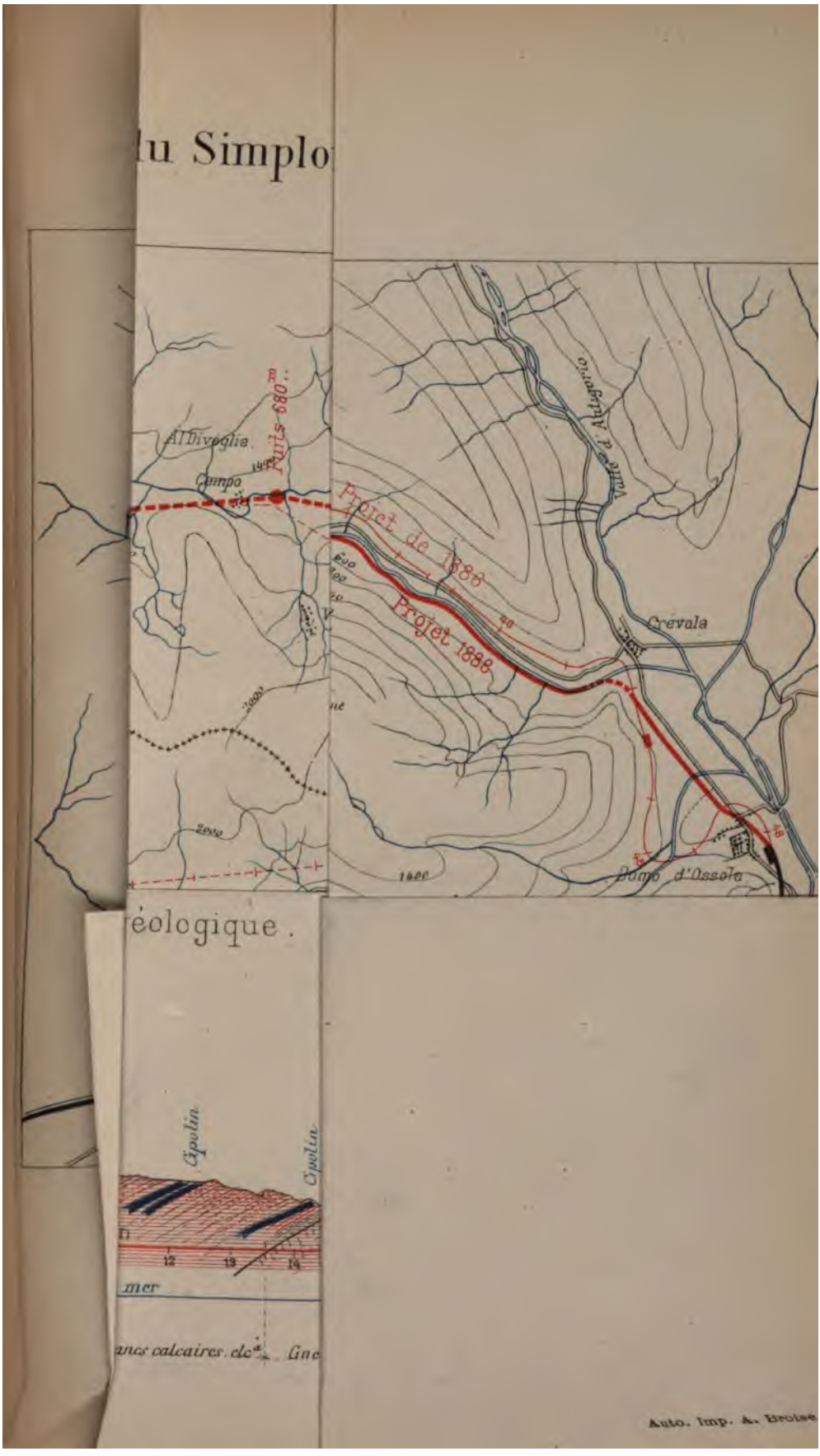
Paris. — Imp. Dubuisson et Cie, rue Coq-Héron, 5 (Pallet, gérant)

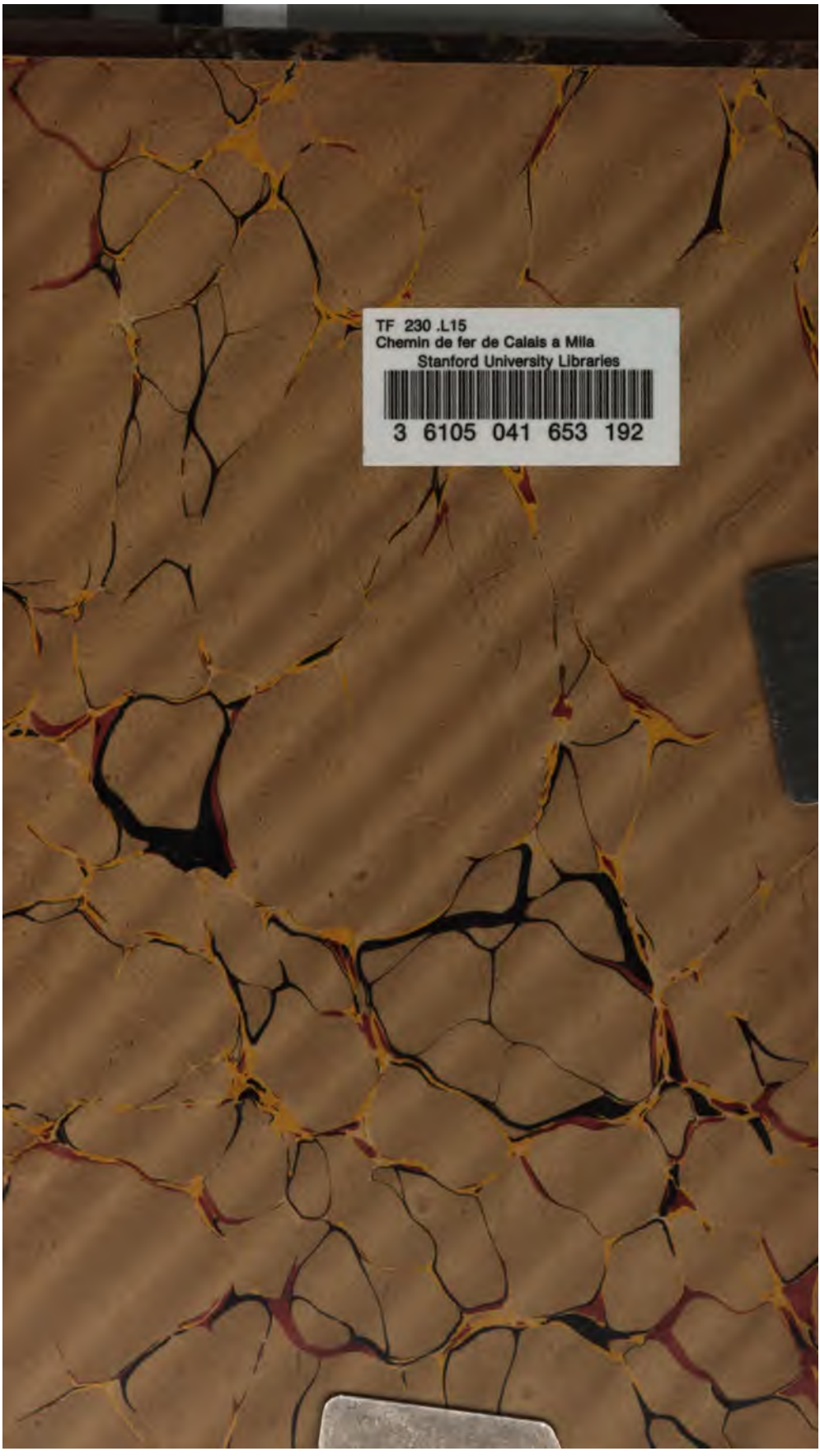
lu Simplo

éologique.



Auto. Imp. A. Erolles & Courtin


lu Simplo
Vallée d'Antrona
Antrona
Alliveglia
Campo
Tunnels 680m
Projet de 1886
Projet 1888
Crevala
Domo d'Ossola
éologique.
Cipolin
Cipolin
mer
Auto. Imp. A. Brolse


TF 230 .L15
Chemin de fer de Calais a Mila
Stanford University Libraries
3 6105 041 653 192